

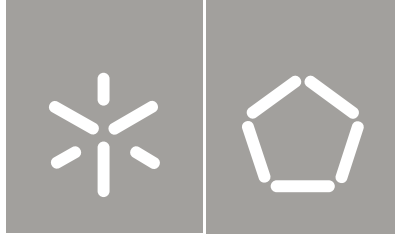


Victor Emanuel Valente Fernandes

Design e processamento de componentes  
leves de alta resistência – Efeito da vibração  
na fluidez do metal.

Universidade do Minho  
Escola de Engenharia





Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Victor Emanuel Valente Fernandes

Design e processamento de componentes  
leves de alta resistência – Efeito da vibração  
na fluidez do metal.

Tese de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professor Doutor Filipe Samuel Silva

Outubro de 2013

À Universidade do Minho.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em meu nome pessoal a todos aqueles que me ajudaram no decorrer da tese.

Ao professor Filipe Samuel Silva, por toda a disponibilidade mostrada e pelo seu conhecimento científico, assim como as suas correções e críticas.

Agradeço à empresa AC Laser, e em particular ao engenheiro e amigo Jerrome Oliveira, por toda a vontade e generosidade demonstrada ao longo deste ano, permitindo encontrar soluções.

Agradeço também à empresa Rivaglobal Lda, em especial ao senhor Ricardo, pela disponibilidade demonstrada e pelo grande auxílio prestado.

Sem esquecer agradeço todo o apoio, paciência, conhecimento e horas perdidas no decorrer da tese aos amigos Paulo Pinto, Óscar Carvalho e Sandro Almendra.

Agradeço a todos os meus amigos e colegas, sem indicar nomes, pois eles sabem quem são, mas acima de tudo à minha família e namorada, pelo apoio e carinho demonstrado ao longo destes anos.

Mais uma vez o meu muito obrigado.



## RESUMO

Com a evolução dos dias que correm, e com a economia e indústria em plena recessão, é necessário criar métodos inovadores de forma a reerguer e a estimular a indústria.

Com os aumentos sucessivos do preço do ouro ao longo dos anos, a indústria da joalheira vê-se obrigada a otimizar os métodos de produção e a criar peças com menos material, de forma a reduzir custos.

Um das possibilidades estudadas pela equipa do projeto Gradouro, de maneira a reduzir custo com material, assim como a utilização desnecessária deste, e não retirar valor acrescentado ao componente, é criar uma microestrutura interna de forma que este tenha a mesma resistência mecânica, com menos quantidade de material.

Um dos problemas que se opõem, é a fundição desta microestrutura interna no interior de componentes de tamanho e espessuras reduzidas, do tipo de um anel. Este problema pensa-se estar relacionado com os fenómenos de transferências de calor, isto é, existe muita transferência de calor com as paredes do molde diminuindo assim, a fluidez do material para preencher todas as cavidades do molde.

Ao longo deste trabalho é estudada a influência que a vibração pode provocar no processo de fundição por cera perdida, moldação em bloco, isto é, verificar a influência que a vibração provoca na fluidez do metal.

Para tal foi necessário projetar e construir, uma máquina que provoca-se vibração na moldação, e ao mesmo tempo, que encaixe na máquina de fundição *INDUTHERM*, presente no laboratório de materiais da Universidade do Minho.

Depois da otimização da máquina concluída, isto é, depois de assegurar que tudo estava dentro do previsto de forma a não provocar danos na *INDUTHERM*, foram feitos testes para verificar a influência dos diferentes níveis de vibração, nos fundidos.

Feitos os testes passou-se para a fase de recolha de dados, que consistiu na medição do tamanho dos diferentes tipos de amostras. Após retirados os todos os dados, estes foram tratados no software *Excel*, onde posteriormente foram construídos gráficos, de vibração/fluidez, que permitiu fazer uma análise dos resultados.

Por fim, é feita uma conclusão onde são focados os principais pontos deste estudo.

## PALAVRAS-CHAVE

Fundição, Vibração, Frequência e Fluidez.





## **ABSTRACT**

With the evolution of the current day and age, and with both the economy and the industries entering recession, it is necessary to develop and create innovative methods, in order to rebuild and to stimulate industries.

With the successive increases in the price of gold over the years, the jewellery industry is forced to optimize its methods of production and to create and produce pieces with lower added value, as a mean to reduce costs.

One of the possibilities studied by the Gradouro project team, to reduce material costs, as well as, the unnecessary use of these, without removing the added-value component, is to create an internal micro structure with the same mechanical resistance, however with lower amounts of material.

One of the opposing problems, is the casting of this internal micro structure within components of reduced size and thickness, similar to that of a ring. This problem is thought to be related to the phenomena of heat transfer, that is, there is a lot of heat transfer with the walls of the mold therefore removing the flow of the material to fill all the mold cavities.

Throughout this study, the influence that may be caused by vibration in the casting process through lost wax, block casting, i.e. checking the influence that vibration causes on metal fluidity is studied.

For this, it was necessary to design and to build a machine that causes vibration whilst molding and, at the same time, that engages itself with the casting machine INDUTHERM, present in the materials laboratory at the University of Minho.

After optimization of the completed machine, that is, after ensuring that everything was as planned so as not to cause any type of damage to the INDUTHERM, tests were undergone to verify the influence of different levels of vibration, on the castings.

Once the tests were done, the next stage of data collection proceeded, which consisted in measuring the size of the different types of samples. Having all the data collected, these were then worked and handled on Excel software, where vibration/fluidity graphics were afterwards created, allowing for the analysis of the results to be undergone.

To finish, a conclusion referring to and focusing the main points dealt with in this study.

## **KEYWORDS**

Casting, Vibration, Frequency and Fluidity.



## ÍNDICE

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Palavras-Chave .....	vii
Abstract.....	ix
Keywords .....	ix
Índice .....	xi
Índice de figuras .....	xv
Lista de tabelas .....	xix
Lista de equações.....	xxi
Lista de siglas.....	xxiii
Parte I - Fundamentos teóricos.....	1
1. Introdução.....	2
2. Estado da arte .....	4
2.1. Fundição .....	4
2.1.1.Fundição em cera perdida, moldação em bloco.....	7
2.1.2.Contração volumétrica .....	9
2.1.3.Fundição por gravidade, por pressão, baixa pressão, e sob vácuo.....	10
2.1.4.Material cerâmico .....	11
2.2. Fluido.....	12
2.2.1.Fluides .....	12
2.3. Transferência de calor .....	14
2.3.1.Fenómenos de transferência de calor .....	14
2.4. Vibração e quantificação da vibração .....	16
2.4.1.Vibração .....	16
2.4.2.Quantificação da vibração .....	18
2.5. Estudos realizados.....	19
2.5.1.Vibração durante o vazamento .....	19
2.5.2. Vibração durante a solidificação .....	20
2.5.3.Influência da vibração nos fenómenos de transferências de calor .....	21
Parte II - Projecto do dispositivo de vibração .....	25

3. Projecto do dispositivo de vibração.....	26
3.1. Levantamento das medidas de atravancamento .....	27
3.2. Solução adotada .....	27
3.3. Redutor de velocidade .....	28
3.4. Fixação dos componentes ao motor .....	29
3.5. Criação da vibração .....	30
3.5.1. Superfície de vibração.....	30
3.5.2. Apalpador/ Suporte de apalpador .....	32
3.6. Cabeça.....	33
3.7. Fixação do dispositivo de vibração à <i>Indutherm</i> .....	35
3.8. Dispositivo final .....	35
3.9. Acoplamento na INDUTHERM.....	37
3.10. Padronização da velocidade/ Frequência de vibração.....	38
Parte III - Processo experimental .....	41
4. Processo experimental.....	42
4.1. Produção das amostras e criação da rugosidade .....	42
4.2. Montagem da árvore/cacho.....	44
4.3. Fabrico da moldação .....	45
4.3.1. Introdução da árvore dentro do cilindro/chassi.....	45
4.3.2. Fabrico do material cerâmico.....	46
4.4. Ciclo térmico .....	48
4.5. Material utilizado .....	50
4.5.1. Constituição e composição da liga .....	50
4.5.3. Ponto de fusão .....	54
4.6. Condições de vazamento .....	54
4.7. Desmoldação .....	56
Parte IV - Resultados obtidos e discussão .....	59
5. Resultados obtidos e discussão.....	60
5.1. Análise de resultados das amostras do tipo A,B e C .....	61
5.1.1. Análise de resultados das amostras do tipo A.....	62
5.1.2. Análise de resultados das amostras do tipo B.....	63
5.1.3. Análise de resultados das amostras do tipo C.....	65

5.1.4. Resumo das análises das amostras do tipo A, tipo B, e tipo C .....	67
5.2. Análise de resultados das amostras do tipo D,E e F .....	67
5.2.1. Análise de resultados da amostras do tipo D .....	68
5.2.2. Análise de resultados das amostras do tipo E.....	70
5.2.3. Análise de resultados das amostras do tipo F .....	71
5.2.4. Resumo das análises das amostras do tipo D, tipo E, e tipo E .....	73
5.3. Discussão.....	74
Parte V - Conclusões .....	77
6. Conclusões.....	78
Parte VI - Trabalhos Futuros .....	81
7. Trabalhos Futuros.....	82
Parte VII - Referências Bibliográficas .....	83
8. Referências Bibliograficas .....	84
Parte VIII – Anexos - Desenhos técnicos das peças produzidas .....	87



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- O conceito de baixo peso do anel de joias e de alta resistência .....	3
Figura 2 – Modelo simples .....	3
Figura 3 - Exemplo de peça 2D.....	3
Figura 4 - Anel onde o conceito de material novo pode ser aplicado com vantagem .....	3
Figura 5 - Metal vazado dentro da moldação .....	4
Figura 6 – Escoamento Laminar .....	13
Figura 7 – Escoamento turbulento .....	13
Figura 8 – Fenómeno de condução .....	14
Figura 9 – Fenómeno de convecção .....	15
Figura 10 – Fenómeno de radiação .....	16
Figura 11 –Vibração periódica .....	17
Figura 12 –Vibração transiente .....	17
Figura 13 –Vibração aleatória .....	17
Figura 14 – Resultados obtidos nos dois termopares .....	21
Figura 15 – Mecanismo proposto .....	22
Figura 16 – Máquina INDUTHERM .....	26
Figura 17 – Camara da INDUTHERM .....	26
Figura 18 – Motor de aspirador .....	27
Figura 19 – Roda dentada helicoidal, e parafuso sem fim .....	29
Figura 20 – Barra fixadora.....	30
Figura 21 – Motor de aspirador com o redutor montado .....	30
Figura 22 – Superfície com inclinação .....	30
Figura 23 – Roda dentada helicoidal com os pinos .....	31
Figura 24 – Roda dentada helicoidal acoplada com a superfície .....	32
Figura 25 – Apalpador acoplado no suporte.....	32
Figura 26 – Modelo virtual 3D, guiamento do parafuso sem fim .....	33
Figura 27 – Cabeça, acoplamento do suporte e apalpador.....	33
Figura 28 – Cabeça, modelo virtual e real.....	34
Figura 29 – Furo de guiamento para o veio da roda dentada helicoidal .....	35
Figura 30 – Cilindro de ligação .....	35
Figura 31 – Veio da INDUTHERM .....	35

Figura 32 – Dispositivo de vibração final .....	36
Figura 33 – Variador de potência.....	36
Figura 34 – Acoplamento do dispositivo de vibração na camara da INDUTHERM .....	37
Figura 35 – Imposição da vibração.....	39
Figura 36 – Jato de areia .....	42
Figura 37 – Folha de acetato.....	43
Figura 38 – Amostra de 0.3 mm .....	43
Figura 39 – Modelador de cera.....	44
Figura 40 – Árvore/ Cacho montado .....	45
Figura 41 – Árvore dentro do chassi .....	45
Figura 42 – Chassi selado .....	46
Figura 43 – Produção da mistura .....	46
Figura 44 – Máquina de vácuo .....	47
Figura 45 – Vazamento da mistura.....	47
Figura 46 – Moldação final.....	48
Figura 47 – Mufla ou forno.....	48
Figura 48 – Ciclo térmico utilizado no caso de estudo (TM: Temperatura da moldação).....	49
Figura 49 – Diagrama de fases Alumínio – silício .....	51
Figura 50 – Influência da percentagem de silício .....	52
Figura 51 – Linha de arrefecimento para ligas eutécticas .....	52
Figura 52 – Fluxo do metal líquido para metais puros e ligas eutécticas .....	53
Figura 53 – Dendrite formada nas paredes da moldação, solidificação em camada espessa .....	53
Figura 54 – Esquema da ponta de interrupção de metal, solidificação em camada fina .....	53
Figura 55 – Painel da INDUTHERM .....	55
Figura 56 – Desmoldação .....	56
Figura 57 – Componente obtido após vazamento e desmoldação .....	57
Figura 58- Árvores criadas para a análise de 0,3 mm, para as amostras do tipo A,B e C .....	61
Figura 59- Gráfico da relação fluidez/vibração para as amostras do tipo A .....	62
Figura 60- Gráfico da relação fluidez/vibração para as amostras do tipo A, em comparação com a linha de tendência .....	63
Figura 61- Gráfico da relação fluidez/vibração para as amostras do tipo B .....	64



Figura 62- Gráfico da relação fluidez/vibração para as amostras do tipo B, em comparação com a linha de tendência .....	65
Figura 63- Gráfico da relação fluidez/vibração para as amostras do tipo C .....	66
Figura 64- Gráfico da relação fluidez/vibração para as amostras do tipo C, em comparação com a linha de tendência .....	66
Figura 65 - Árvores criadas para a análise de 0,6 mm, para as amostras do tipo D,E e F. ....	68
Figura 66 - Gráfico da relação fluidez/vibração para as amostras do tipo D .....	69
Figura 67 - Gráfico da relação fluidez/vibração para as amostras do tipo D, em comparação com a linha de tendência .....	69
Figura 68 - Gráfico da relação fluidez/vibração para as amostras do tipo E .....	70
Figura 69 - Gráfico da relação fluidez/vibração para as amostras do tipo E, em comparação com a linha de tendência .....	71
Figura 70 - Gráfico da relação fluidez/vibração para as amostras do tipo F .....	72
Figura 71 - Gráfico da relação fluidez/vibração para as amostras do tipo F, em comparação com a linha de tendência .....	72



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1- Representação da utilização mais adequada dos materiais com os processos .....	6
Tabela 2 – Valores típicos da contração volumétrica .....	10
Tabela 3 – Unidades do sistema ISO usadas na vibração .....	19
Tabela 4 – Inclinação e amplitude originadas .....	31
Tabela 5 – Velocidades padronizadas, aceleração e respectivas frequências .....	38
Tabela 6 – Rugosidade média média obtida nas amostras .....	44
Tabela 7 - Condições de ensaio .....	56



## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Número de Reynolds.....	13
Equação 2: Condução .....	14
Equação 3: Convecção.....	15
Equação 4: Radiação.....	16
Equação 5: Fluxo máximo .....	16
Equação 6: ROOT MEAN SQUARE .....	18
Equação 7: Velocidade .....	18
Equação 8: Aceleração.....	18
Equação 9: Velocidade de saída da roda dentada .....	28
Equação 10: Relação de transmissão .....	29



## LISTA DE SIGLAS

$Re$  = *Número de Reynolds*

$V$  = *velocidade*

$L$  = *Comprimento percorrido pelo fluido*

$\vartheta$  = *Viscosidade cinemática*

$q$  = *Fluxo de calor transferido*

$K$  = *Condutividade térmica do material*

$k$  = *Área de superfície pelo qual o calor flui*

$l$  = *Espessura de parede*

$\Delta T$  = *Diferença de temperatura*

$h$  = *Coeficiente de transferência convectiva de calor*

$A$  = *Área de superfície*

$T_s$  = *Temperatura da superfície*

$T_\infty$  = *Temperatura do fluido*

$\sigma$  = *Constante de Stefan – Boltzman*

$\varepsilon$  = *Emissividade da superfície*

$RMS$  = *ROOT MEAN SQUARE*

$x_i$  = *Valor numérico da amplitude de cada pico*

$N$  = *Número de picos*

$v$  = *Velocidade*

$A$  = *Amplitude*

$f$  = *Frequência*

$a$  = *Aceleração*

$N_c$  = *nº de rotações por minuto da roda dentada helicoidal*

$NP$  = *nº de rotações por minuto do veio com dentado helicoidal*

$Ne$  = *nº de entradas do parafuso sem – fim*

$Z_c$  = *nº de dentes da coroa*

$i_{cp}$  = *Relação de transmissão*

$TM$  = *temperatura da moldação*

$TV$  = *Temperatura de vazamento*





## **PARTE I - FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

### 1. INTRODUÇÃO

O aumento do preço do ouro está a impulsionar as empresas de joias para produzir componentes de baixo peso. Componentes de baixo peso devem consistir numa película externa e uma estrutura interna para dar resistência mecânica ao componente. Esta área consiste num novo conceito de materiais de estrutura, em que é combinado com a resistência estrutural elevada. A característica essencial da ideia, é que os componentes de ouro desse tipo com uma estrutura interna dedicada devem ser obtido diretamente pelo vazamento Figura 1. Tecnologia de fundição, é a arte da produção de joalharia. Para implementar esta abordagem do novo design, algumas mudanças são necessárias no projeto atualizado, desenvolver modelo de fundição e controlar o processo. Fluidez é um importante parâmetro necessário para obter estas estruturas. A fim de melhorar a fluidez, a vibração é provavelmente uma das variáveis menos estudadas. No entanto, estudos recentes, [1, 2], têm mostrado que a vibração no molde pode melhorar substancialmente a fluidez do metal. Foi recentemente relatado que certos níveis de vibração (produzindo uma aceleração de 0,8 G ( $8, \text{ m/s}^2$ )), durante o enchimento de metal podem melhorar a fluidez cerca de 30% de uma liga Al-Si [2].

Quando aplicado durante a solidificação (após a fusão do material) vibração já provou ser relevante. Um trabalho anterior feito pela equipa envolvida neste trabalho [1], mostrou que, em certos níveis de aceleração (vibração mecânica com acelerações de cerca de  $40\text{m/s}^2$ ) as propriedades mecânicas dos materiais podem apresentar melhorias de cerca de 20% na tensão de rutura e 50 % na tensão de rutura numa liga Al-Si. No entanto, também tem sido demonstrado que as vibrações mais elevadas podem produzir um efeito prejudicial sobre as propriedades mecânicas.

O fenómeno físico que parece ser capaz de explicar os resultados obtidos parecem estar ligados à transferência de calor do metal para as paredes do molde. Até uma certa amplitude de vibração aumenta a transferência de calor do metal devido a um fluxo turbulento induzido. O calor flui através do metal e atinge a parede do molde e é transferida para o molde que promove uma rápida solidificação. No entanto, se o nível de energia da vibração atingir um determinado limite, há uma perda de contacto entre o metal e a parede do molde e a transferência de calor entre o metal e o molde é reduzida. [1]

Este fenómeno parece ser capaz de ser aplicado com vantagem no processo de fundição, quando se pretende uma maior fluidez e propriedades mecânicas elevadas. Durante o enchimento o nível de vibração deve ser suficientemente elevado de modo a evitar o contacto entre o molde e o metal. Isto permite manter o calor no metal e impediria a solidificação prematura. Depois do enchimento o nível de vibração deve ser reduzido para um determinado nível, a fim de promover a

transferência de calor no interior do metal, mas também permitir o contacto entre o metal e o molde, e assim, promover a uma taxa mais rápida de solidificação e consequentes propriedades mecânicas melhoradas.

Assim, parece que, com base na teoria existente e os resultados anteriores [1], [2] a vibração pode ser utilizada de modo a promover um dos objetivos do novo conceito da conceção de materiais como se mostra nas Figura 2. Se assim suceder a este estudo, pode dar origem a equipamentos de fundição mais avançados e com um conceito de novos materiais.

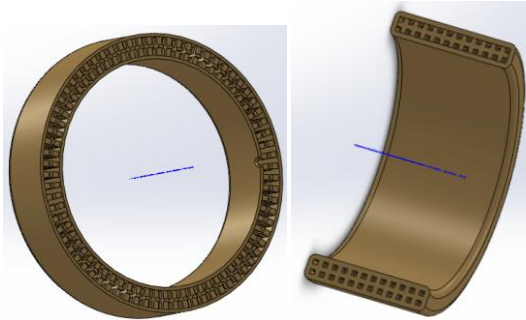


Figura 1- O conceito de baixo peso do anel de joias e de alta resistência

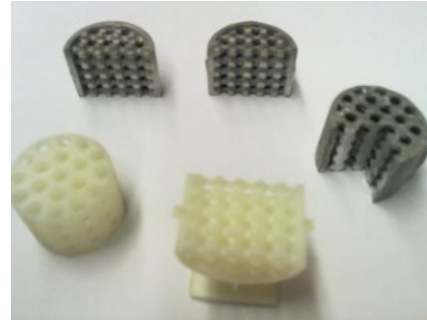


Figura 2 – Modelo simples

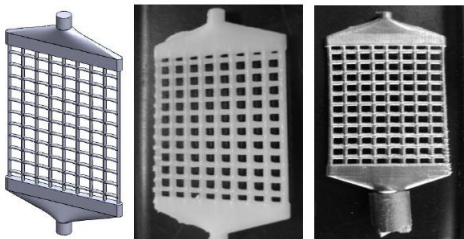


Figura 3 - Exemplo de peça 2D



Figura 4 - Anel onde o conceito de material novo pode ser aplicado com vantagem

### 2. ESTADO DA ARTE

Neste capítulo é apresentado o estado da arte dos diferentes domínios científicos, no qual este trabalho está inserido. No capítulo 2.1, é descrito o processo de fabrico de fundição em geral. Este subdivide-se em subcapítulos, onde são abordados vários temas da fundição, que estão relacionados com o trabalho.

O capítulo 2.2, aborda o tema de fluidez e a sua importância para o processo de fundição. São também descritos os vários escoamentos que o material líquido pode ter durante o vazamento.

Um dos temas que é muito importante na fundição, são os fenómenos de transferência de calor. Este tema é tratado no capítulo 2.3, onde são descritos os 3 fenómenos, condução, convecção e radiação.

O principal objetivo deste trabalho é verificar a influência da vibração no processo de fundição. Este tema é relatado no capítulo 2.4, onde se define vibração e os métodos de quantificação.

E por fim o capítulo 2.5, são explicados três estudos que foram realizados utilizando a vibração.

#### 2.1. Fundição

A fundição é o processo de fabrico que consiste fundamentalmente em preencher com metal líquido a cavidade criada pela moldação, com a geometria e medidas pretendidas, “*o líquido toma a forma do vaso que o contém*” [3], Figura 5.

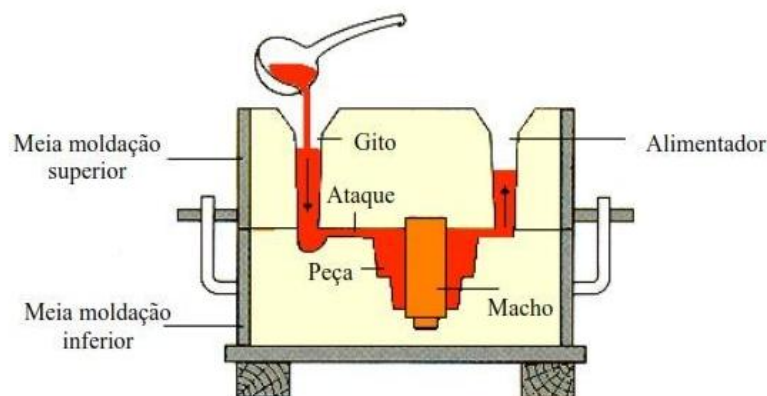


Figura 5 - Metal vazado dentro da moldação [4]

Esta técnica é utilizada para o fabrico de uma vasta gama de peças, isto é, desde peças de geometria muito simples, a peças de elevada complexidade geométrica, assim como, peças de dimensões muito reduzidas a peças de dimensões elevadas.

Hoje em dia é quase impossível desenhar uma peça que não seja possível produzi-la por este processo. Contudo os desenhos podem e devem ser efetuados de modo a facilitar a fundição das peças, com o intuito de minimizar custos e tempos de produção.

Os processos de fundição podem ser classificados em três tipos de processos, sendo eles, processo de moldação perdida/modelo permanente, processo de moldação perdida/modelos perdidos e por fim, processo com moldação permanente [3].

No primeiro processo, a moldação é considerada perdida, isto porque, para cada peça solidificada é necessário abater a moldação para retirar a peça fundida, mas o modelo é permanente, normalmente em metal, pois permite criar mais moldações, sem que haja grandes variações. O segundo processo a moldação e molde são considerados perdidos, pois para extrair a peça é necessário abater a moldação, e o molde é feito com material evaporável. O último processo permite fazer uma série de peças, sem que estas sejam alteradas significativamente, ou seja, nas moldações metálicas por exemplo, cada peça vazada e solidificada na moldação procedemos há abertura da mesma para retirar a peça fundida, podendo assim fazer uma série de peças com a mesma moldação.

Nas moldações perdidas/modelo permanente estão presentes processos de fundição como, moldação em areia verde, moldação em areia seca, moldação em Shell – Moulding, entre outros. As moldações perdidas/modelos perdidos, estão englobados processos como por exemplo, processo de fundição com moldação em areia e modelo evaporável, e também processo de fundição com moldação em agregado refratário por modelos perdidos.

Nas moldações permanentes existem, processo de vazamento por gravidade em moldações metálicas, processo de vazamento sob pressão em moldações metálicas, processo de vazamento sob baixa-pressão em moldações metálicas, processos de vazamento em moldações metálicas por compressão mecânica, etc.

Para a obtenção de fundidos de qualidade é necessário escolher o processo mais adequado. Uma vez que existe um vasto leque de processos, a indústria especializou-se em cada tipo, de maneira a aplicar processos específicos de fundição para fazer os materiais, podendo assim, obter a peça com o rigor dimensional e acabamento pretendido. Na Tabela 1, está uma representação dos diferentes materiais, com os processos que mais se adequam.

Tabela 1- Representação da utilização mais adequada dos materiais com os processos [3]

<b>Grupo de liga</b>	<b>Designação da liga</b>	<b>Processo de fundição</b>
Ferros Fundidos	Ferro fundido cinzento (Grafite lamelar) Ferro fundido nodular (Grafite esferoidal) Ferro fundido maleável Ferro fundido branco, Ferro fundido mesclado, Ferro fundido de grafite vermicular Ferro fundido austemperado Ferros ligados	Moldação em areia verde
Aços	Aços ao carbono correntes, Aços de baixa liga, Aços de alta liga Aço ligado resistente ao calor, Aço ligado resistente ao desgaste, Aço ligado resistente ao ataque químico	Moldação em areia, moldações cerâmicas
Alumínio	Ligas de alumínio A9, A8, A7, A5, A4....	Moldações em areia
Cobre	Latão, Bronze duro de canhão, Bronze alumínio, Bronze silicioso, Crupo crómio, Cupro Berílio	Moldações permanentes metálicas

Magnésio	Ligas de Magnésio	Moldações em areia, Moldações permanentes metálicas por injeção
Zinco	Ligas de zinco	Moldações permanentes metálicas por injeção
Super Ligas	Ligas de Níquel, Ligas de Cobalto	Moldação com modelos perdidos
Diversas	Ligas de Titânio, Ligas para rolamentos, Ligas magnéticas Ligas refratárias	Tecnologias de fundição especiais

#### 2.1.1.1.FUNDIÇÃO EM CERA PERDIDA, MOLDAÇÃO EM BLOCO

O processo que mais se adequa, e que é utilizado ao longo deste trabalho, é o processo de fundição por cera perdida (moldação em bloco).

Este utiliza gesso no fabrico da moldação, que por sua vez é obtida por cera sintética. Este processo tem capacidades para produzir peças de elevada qualidade e rigor dimensional, tanto que, é utilizado na indústria aeroespacial, automóvel, eletrónica e também na indústria da joalheria.

Este processo tem várias etapas a ser executadas até há obtenção da peça final. Estas estão listadas abaixo:

- Fabrico do contra molde para obtenção de uma réplica em cera da peça
- Fabrico do contra molde para obtenção do sistema de enchimento e alimentação
- Montagem do cacho, por união com cera fundida
- Revestimento do cacho com material cerâmico
- Eliminação da cera através de um aquecimento na moldação
- Tratamento térmico na moldação
- Vazamento do metal
- Abate da moldação, após solidificação do metal

O contra molde de uma peça, é que vai ditar a precisão final da peça fundida, visto que o contra molde é a cavidade que vai ser preenchida com cera líquida que posteriormente dá origem há peça metálica. Ou seja, o processo de cera perdida está em grande parte dependente da precisão do

contra molde. Esta precisão está dependente do material utilizado no fabrico do contra molde, mas também da capacidade que a cera possui para preencher todas as cavidades do molde.

Após a obtenção dos moldes em cera, é montado o cacho. Este é ligado através de uma soldadura em cera entre os moldes e o sistema de enchimento. Este processo é executado manualmente, e por vezes são utilizadas ferramentas de posicionamento, de forma a reduzir erros humanos, tais como, molde deslocado, ou então, soldadura mal executada.

Para a obtenção da moldação em bloco, o cacho de cera é colocado de forma invertida sobre uma borracha vedante que tem a forma da bacia de enchimento/alimentador. Posteriormente é colocado o chassi a envolver todo o cacho. De seguida é vazado o material cerâmico de forma a cobrir todo o cacho de cera e a encher o chassi.

O material cerâmico utilizado é uma mistura refratária de gesso e sílica, onde o elemento ligante é a água. Esta mistura é feita com a adição do material cerâmico ao elemento aglomerante, e misturado com um misturador apropriado. De salientar que a mistura deve ser vazada o mais rápido possível, porque esta começa a solidificar rapidamente.

Após a solidificação do material cerâmico, é necessário eliminar a cera presente dentro da moldação, e fornecer ao bloco as características mecânicas necessárias. Para tal, é feito um aquecimento muito lento do bloco num forno elétrico até aos 150 °C, para evitar a fissuração por choque térmico, ou mesmo por desidratação, mas também para ocorrer uma evaporação lenta da água, e fusão lenta da cera, de modo a que todas as cavidades fiquem isentas de cera.

Depois de eliminada a cera existentes dentro da moldação, ocorre um ciclo térmico que tem como objetivos os seguintes tópicos:

- Remover pequenos resíduos de cera, que possam ainda estar presentes,
- Fornecer as características mecânicas necessárias há moldação, de forma a suportar o vazamento,
- Aumentar a permeabilidade da moldação, através da eliminação de constituintes voláteis
- Diminuir a diferença de temperatura entre a moldação e o metal durante o vazamento, facilitando o enchimento dos pormenores.

A temperatura do ciclo térmico depende das dimensões do bloco e dos materiais refratários utilizados, mas geralmente é efetuado a temperaturas próximas dos 800°C.

Quando o ciclo térmico chega ao fim, a moldação está preparada para sofrer o vazamento do metal.



O vazamento do metal pode ser feito por gravidade, por baixa pressão, vácuo, ou alta pressão, dependendo das características geométricas da peça e metalúrgicas do metal.

Seguido o vazamento é inevitável fazer o abate da moldação. Esta pode ser feita de várias formas:

- Projeção de água,
- Dissolução química,
- Ultra-sons.

As peças finais apenas são obtidas depois de serem removidos por corte, os canais de enchimento e alimentadores, através de maquinagem. As operações de acabamento destas peças devem ser mínimas, ou mesmo inexistentes, pois pode piorar o acabamento superficial e a precisão dimensional. Quando necessário fazem-se pequenas rebarbagens, de maneira a retirar material que não seja desejado.

No caso de peças primorosas, faz-se um polimento em tambores de esferas, e uma limpeza, como no caso de peças de joalheria.

### 2.1.2.CONTRAÇÃO VOLUMÉTRICA

O arrefecimento do metal desde o estado líquido até a temperatura ambiente é acompanhado por uma redução de volume significativa, que se designa por contração [3]. Esta contração ocorre em três estágios diferentes sendo eles:

- Contração no estado líquido
- Contração de solidificação
- Contração no estado sólido

Na fundição a contração de solidificação, isto é, contração que se verifica do estado líquido para sólido, é a mais difícil de controlar, e de maior extensão estando afetada pelo tipo de material.

Na fundição em cera perdida com gesso (moldação em bloco), torna-se ainda necessário criar moldes com dimensões superiores às desejadas na peça final. Isto é necessário devido a problemas de contração volumétrica do metal durante a solidificação como dito anteriormente, mas também a possíveis operações de maquinagem que sejam necessárias. A dimensão do molde vai ser então, a dimensão desejada para a peça final mais as tolerâncias necessárias.

Na Tabela 2, estão representadas os valores típicos da contração de solidificação de alguns materiais.

Tabela 2 – Valores típicos da contração volumétrica [3]

<b>Ligas metálicas/Metais</b>	<b>Contração de volumétrica (%)</b>
Aços	7-10
Ferros fundidos brancos	6-7
Ferros fundidos cinzentos	3-4
Ferros fundidos nodulares	4-6
Bronzes	4,5
Bronzes de alumínio	5,5
Latões	6-7
Ligas de alumínio	7-8
Ligas de magnésio	4-5
Zinco	4,7
Cobre	4,2
Níquel	5

Os principais problemas originados pela contração volumétrica durante o arrefecimento e solidificação, é a peça ficar com dimensões inferiores as desejadas, aparecimento de cavidades internas ou cavidades com ligação ao exterior. Tudo isto, influenciado também pelo tipo de material ou liga metálica, das condições de arrefecimento e o tipo de moldação.

### 2.1.3.FUNDIÇÃO POR GRAVIDADE, POR PRESSÃO, BAIXA PRESSÃO, E SOB VÁCUO

Fundição por gravidade, é um processo que já existe à centenas de anos. Esta consiste no vazamento do metal para a cavidade moldante, apenas pela ação da força da gravidade. Este processo é considerado o mais simples da fundição, tendo como principal vantagem a utilização de machos em areia, metal, ou cerâmico, que permitem definir pormenores geométricos que não é possível obter diretamente com a moldação. A fundição por gravidade também é utilizada nas moldações metálicas. Contudo, á semelhança das moldações feitas noutro tipo de material, estas também tem de possuir canais de escoamento de ar e gases, visto que é completamente impermeável.

Fundição por pressão, tem o mesmo princípio da fundição por gravidade, isto é, preencher a cavidade moldante com metal líquido, mas neste o metal é introduzido sob pressão no interior da cavidade moldante, processando-se a solidificação sob a ação dessa mesma pressão. Na atualidade este processo esta a extinguir a fundição por gravidade, visto que esta permite obter fundidos de espessuras reduzidas, na ordem dos milímetros, geometrias de grau muito elevado, e tolerâncias dimensionais muito estreitas. Este permite uma elevada cadência de produção, em relação a todos os processos de fundição, quando associado há automatização. Neste método conseguimos ter a principal vantagem que não conseguimos obter pelos processos clássicos, que é a isenção de ar do metal, que pode provocar defeitos no fundido.

Fundição de baixa pressão, a moldação é posicionada na parte superior de uma câmara selada que contém o metal líquido. O gito tubular prolonga-se do molde até à bacia que contém o metal líquido. Logo que o metal esteja na temperatura ideal de vazamento este é pressurizado para a moldação. Durante a fase de solidificação o gito funciona como alimentador. Este processo é executado a pressões relativamente baixas comparando com a fundição por pressão, o que permite obter fundidos com grão fino, pequenas dendrites e boas propriedades mecânicas.

Fundição sob vácuo, tal como na fundição de baixa pressão a moldação é posicionada na parte superior de uma câmara. O processo em si é muito idêntico, mas neste é criado vácuo na cavidade do molde em vez de pressurizado como no anterior, que por sua vez vai puxar o metal líquido para dentro da cavidade. Este tipo de processo permite obter excelentes propriedades mecânicas, e permite uma alta cadência de produção, visto que trabalha com baixas temperaturas nos moldes.

### 2.1.4.MATERIAL CERÂMICO

Como já dito anteriormente, o material cerâmico utilizado é uma mistura refratária de gesso e sílica, onde o elemento ligante é a água. A fundição por moldação em gesso tem-se tornado ao longo dos anos, muito utilizada para a fundição de materiais não ferrosas, tais como, cobre, bronze, alumínio, etc. Tem se tornado muito utilizado devido á sua capacidade de condutividade térmica ( $0.20$  a  $0.45 \text{ cal/m.s}^\circ\text{C}$ ) [3], o que significa que a taxa de arrefecimento dentro do molde é muito baixa, promovendo o enchimento total de todos os orifícios, uniformidade das propriedades mecânicas, e uniformidade da estrutura. Por outro lado o arrefecimento lento, também proporciona o aumento do tamanho de grão, o que vai reduzir as propriedades mecânicas, inclusive a tenacidade.

Este tipo de processo de fundição com gesso não se adequa a materiais ferrosos, devido às elevadas temperaturas de vazamento, o enxofre presente no gesso reage com o metal líquido, dando origem a peças com fraco acabamento superficial.

### **2.2. Fluido**

#### 2.2.1.FLUIDEZ

Para que a operação de fundição tenha sucesso é necessário que durante o vazamento e solidificação, o fluxo de fluido, neste caso metal líquido, tenha um comportamento adequado, de modo a que todas as cavidades pretendidas sejam preenchidas. Esse comportamento adequado designa-se pela capacidade que o metal líquido tem para fluir nos canais de enchimento (fluidez).

O fluxo de metal está dependente da viscosidade do metal líquido, pois caso a viscosidade seja elevada, pouca fluidez, pode iniciar-se a solidificação do material, pelas paredes da moldação, que é a zona de maior área de contacto, e ocorre uma redução de fluxo progressiva da secção dos canais, até ao ponto de todos os canais estarem solidificados. Este tipo de solidificação apenas ocorre em ligas metálicas. Em metais puros, ou ligas eutéticas, o metal flui com facilidade, e a solidificação a ser homogéneo e no seio do metal líquido. “Fluidez, é o termo usado para descrever o comportamento macroscópico do metal líquido durante o vazamento no interior da moldação, ou durante o escoamento pelas passagens internas ou canais de gitagem da moldação. [3]”, partindo desta definição podemos dizer que fluidez é capacidade que o metal líquido tem para fluir livremente no interior de um molde, preenchendo-o completamente, antes que sua solidificação o impeça. Quanto maior for a fluidez do fluido, maior é a sua capacidade para produzir detalhes existentes na moldação. Esta está diretamente relacionada com a temperatura, ou seja, quanto maior a temperatura menor será a viscosidade, e o mesmo acontece no caso inverso, quanto menor a temperatura maior será a viscosidade.

A viscosidade vai causar atrito no fluxo do metal, o que vai provocar uma redução de velocidade, e por conseguinte maior tempo de contacto com as paredes. Esse contacto vai fazer com que o metal transfira calor para as paredes, e solidifique prematuramente nos canais como dito anteriormente, obstruindo assim os canais, o que leva ao não preenchimento total da moldação, originando defeitos.

Outra das considerações que é necessário ter em conta, é o tipo de escoamento que está a ocorrer, laminar ou turbulento.

O escoamento laminar Figura 6, *é usado como sinónimo para indicar um escoamento que se processa em lâminas ou camadas* [5], ou seja, o fluido move-se em camadas, ou lâminas escorregando sobre o adjacente, havendo apenas trocas de quantidade de movimento molecular.

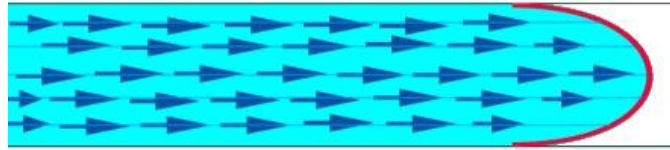


Figura 6 – Escoamento Laminar [6]

Quanto ao escoamento turbulento Figura 7, este é caracterizado pela variação de componentes como velocidade que sofrem flutuações aleatórias, isto é, as partículas apresentam movimento caótico macroscópico, provocando muitas irregularidades e turbulência no seu fluxo arrastando ar junto com o metal.



Figura 7 – Escoamento turbulento [6]

Na realidade, e na maioria dos casos o escoamento que ocorre é turbulento, permitindo que ocorram mais reações do metal líquido com formação de gases. Estes gases provocam a formação de bolhas. Essas bolhas de gás podem ficar presas e constituem defeitos nas peças fundidas.

O escoamento é considerado laminar quando [5]:

- $Re \leq 2000$

Escoamento misto:

- $2000 < Re \leq 20000$

Escoamento turbulento:

- $Re \geq 20000$ .

A expressão que nos permite calcular o número de Reynolds é dado pela seguinte equação [5]:

$$Re = \frac{V \times L}{\vartheta}$$

Equação 1: Número de Reynolds

Na Equação 1, o  $V$ , é a velocidade, o  $L$ , é o comprimento percorrido pelo fluido, e finalmente  $\vartheta$ , é a viscosidade cinemática. Através desta expressão conseguimos saber qual o movimento do fluido em relação à superfície, isto é, o escoamento no qual estamos a trabalhar.

### 2.3. Transferência de calor

#### 2.3.1. FENÓMENOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Calor, “*é o trânsito de energia provocada por uma diferença de temperatura [6]*”, ou seja, calor não é nada mais do que uma forma de energia. Esta energia irá movimentar-se para outro corpo que esteja com uma temperatura inferior, isto devido há diferença de temperaturas entre os dois corpos. A este fenómeno chama-mos de transferência de calor.

Dentro deste fenómeno existem três tipos de transferências de calor, sendo eles, condução, radiação e convecção.

Condução, “*pode ser considerada como a transferência de energia das partículas mais enérgicas de uma substância para as partículas menos enérgicas, graças às iterações das partículas [6]*”. A condução é então um processo pelo qual a energia se transfere de um corpo com a temperatura mais elevada, para outro com a temperatura mais baixa, dentro de um meio sólido, líquido ou gasoso, com contacto físico direto.

Este fenómeno ocorre então, quando dois corpos estão em contacto direto como se verifica na Figura 8, e com temperaturas diferentes.



Figura 8 – Fenómeno de condução [7]

A expressão que traduz este fenómeno é a seguinte [8]:

$$q = k \times A \times \frac{\Delta T}{l}$$

Equação 2: Condução

Onde  $q$ , é o fluxo de calor transferido por condução ( $w/m^2$ ),  $k$ , representa a condutividade térmica do material ( $w/m.k$ ),  $A$ , é a área de superfície pelo qual o calor flui,  $L$ , representa a espessura da parede, e por fim  $\Delta T$ , é a diferença das temperaturas.

Convecção, este modo de transferência de calor compreende dois mecanismos, para além da transferência de energia provocada pelo movimento molecular aleatório (difusão), a energia também se transfere pelo movimento da massa, ou macroscópico, do fluido [6], isto é, a convecção ocorre devido ao movimento das moléculas dos fluidos em movimento, com o escoamento sobre uma superfície sólida. As partículas aquecidas pelo contacto com a superfície sólida, aquecem e tendem a migrar para locais onde a temperatura seja inferior Figura 9. Este fenómeno leva a uma transferência de energia de um local para outro ao qual chama-mos de Convecção.

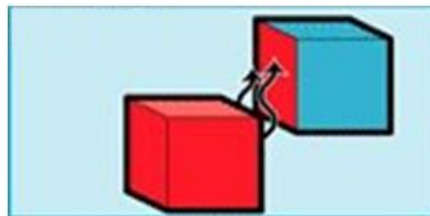


Figura 9 – Fenómeno de convecção [7]

A expressão que traduz a convecção é dada por [8]:

$$q = h \times A \times (T_s - T_\infty)$$

Equação 3: Convecção

Onde  $q$ , é o fluxo de calor convectivo ( $w/m^2$ ), sendo proporcional à diferença de temperaturas  $T_s$  e  $T_\infty$ , sendo  $T_s$ , a temperatura da superfície, e  $T_\infty$  a temperatura do fluido. O  $h$ , é o coeficiente de transferência convectiva de calor ( $w/m^2K$ ), e o  $A$ , é a área da superfície. Em geral, este processo de transferência de calor está dependente da geometria da superfície, assim como a velocidade do fluido.

A radiação é um fenómeno de transferência de calor que ocorre sem a existência de contacto físico entre materiais como demonstra a Figura 10. Este, tal como os fenómenos de transferência descritos anteriormente, transfere energia de um corpo com a temperatura mais elevada, para outro com a temperatura mais baixa.

Esta energia do campo radiação é transportada através das ondas eletromagnéticas, enquanto a condução e convecção necessita do contacto entre materiais, este não necessita de qualquer tipo de contacto.

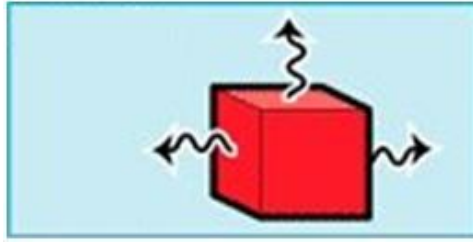


Figura 10 – Fenómeno de radiação [7]

O fenômeno de radiação ocorre com maior eficiência no vácuo, e a expressão que traduz este é dada pela seguinte fórmula [8]:

$$q = \sigma \times A \times T_s^4$$

Equação 4: Radiação

Em que  $q$ , é o fluxo máximo que pode ser emitido por uma superfície ( $w/m^2$ ),  $T_s$ , é a temperatura absoluta, e por fim,  $\sigma$  é a constante de Stefan- Boltzman ( $\sigma=5.67 \times 10^{-8} w/m^2k^4$ ), e o  $A$ , é a área da superfície. Mas a expressão anterior é para uma superfície considerada ideal.

Na realidade é necessário introduzir a emissividade da superfície. Esta propriedade é a eficiência de emissão da superfície, em relação à ideal. A expressão que a traduz é a seguinte [8]:

$$q = \varepsilon \times \sigma \times A \times T_s^4$$

Equação 5: Fluxo máximo

Sendo que  $\varepsilon$ , é a propriedade radiativa da superfície.

Dentro destes fenômenos de transferências de calor todos eles distintos, podemos evidenciar uma propriedade que é comum a todas elas, que é a área. Isto leva-nos a crer que, quanto maior for a área de contacto ou de transferência de calor maior será a energia transmitida por estes processos, isto é, um corpo com a temperatura elevada em contacto com outro corpo com a temperatura muito baixa, vai transferir energia para o que tem temperatura mais baixa, retirando ao que tem temperatura mais elevada.

## **2.4. Vibração e quantificação da vibração**

### **2.4.1.VIBRAÇÃO**

A vibração é a oscilação de um sistema em torno de um ponto de referência, sendo a sua quantificação um parâmetro que permite definir o movimento desse mesmo sistema [8]. A oscilação, é



a variação, normalmente em função do tempo, da magnitude de uma quantidade em função de uma determinada referência, magnitude essa, que é alternadamente maior e menor do que a referência [8].

A partir das definições descritas podemos dizer que a vibração é o movimento oscilatório de um ponto em relação a um ponto de referência. A oscilação deriva da vibração, onde esta é caracterizada pelo movimento de vaivém. À quantidade de vezes que uma massa passa e torna a passar alternadamente pelo mesmo ponto num determinado período de tempo, chama-mos de frequência. Esta é a quantidade de vezes que um fenómeno ocorre num determinado período de tempo, que é medida em Hertz, equivalente a um ciclo por segundo, podendo alcançar a mesma, superior, ou inferior amplitude.

A amplitude consiste no deslocamento máximo da oscilação. É uma medida escalar negativa e positiva da magnitude da onda de oscilação, sendo que esta, é uma das principais características de uma onda, e é a diferença máxima da grandeza que sofre a vibração desde o seu valor médio.

Existem dois tipos de vibração, sendo que os podemos descrever como, periódica e não periódica. A vibração não periódica ainda se subdivide em dois conjuntos, que são eles vibração transiente e aleatória. A vibração periódica Figura 11, é aquela que apresenta as mesmas características ao fim de cada ciclo, isto é, tem um funcionamento uniforme ao longo do tempo. A vibração não periódica transiente, como mostra a Figura 12, ocorre geralmente no arranque, paragem de motores, ou quando existem acelerações. Neste tipo de vibração, o ciclo não é uniforme e a amplitude é crescente ou decrescente conforme a situação (arranque, paragem), assim como o comprimento de onda que também não é uniforme.

Na vibração não periódica, aleatória Figura 13, como o nome indica todas as características são aleatórias, isto é, o ciclo não é uniforme. Este tipo de vibração ocorre em máquinas hidráulicas, túneis de aerodinâmica, etc, devido aos fenómenos de cavitação, e escoamentos turbulentos.

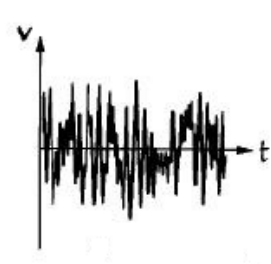
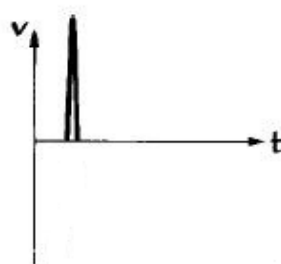


Figura 11 –Vibração periódica [9]    Figura 12 –Vibração transiente [9]    Figura 13 –Vibração aleatória [9]

#### 2.4.2. QUANTIFICAÇÃO DA VIBRAÇÃO

Para quantificar a vibração que é utilizada é necessário conhecer a amplitude utilizada. Para determinar a amplitude apenas é necessário medir o pico de maior amplitude. Mas este método apenas é utilizado para vibrações onde a amplitude máxima está a prejudicar o funcionamento de algum componente. Quando se pretende uma média de toda a vibração produzida pelo sistema, torna-se necessário calcular o ROOT MEAN SQUARE (RMS) [9], valor eficaz da amplitude.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} x_i^2}{N}}$$

Equação 6: ROOT MEAN SQUARE

Em que  $x_i$ , é o valor numérico da amplitude de cada pico, e  $N$ , representa o número de picos medidos. Para além da amplitude também podemos quantificar a vibração em deslocamento, velocidade, ou então aceleração.

O deslocamento é a unidade de medida mais clara, pois é a que evidencia mais facilmente a onda de oscilação, desde o ponto de referência até ao seu ponto máximo, ou seja, a amplitude é igual ao deslocamento. Podemos concluir assim, que o deslocamento apenas depende da amplitude.

Para o cálculo do deslocamento não é considerada a frequência, mas se houver um aumento de frequência e uma amplitude constante, obtêm-se uma vibração mais severa. Nesta situação quantificamos a vibração com a velocidade através da expressão que se segue [9]:

$$v = A \times 2\pi f$$

Equação 7: Velocidade

Em que,  $A$ , é a amplitude e  $f$  a frequência. A expressão da velocidade já contém informação acerca da frequência e amplitude.

Outra quantificação para a vibração é a aceleração. A aceleração é a rapidez com que a velocidade de um corpo varia, ou seja, é a variação da velocidade num período de tempo. Esta é calculada através da expressão [9]:

$$a = A \times (2\pi f)^2$$

Equação 8: Aceleração

Todas as quantificações descritas anteriormente para a vibração, devem ser medidas nas unidades métricas segundo a norma ISO, como mostra a Tabela 3.

---

Tabela 3 – Unidades do sistema ISO usadas na vibração [9]

Amplitude	$\mu\text{m}, \text{mm}$
Deslocamento	$\text{m}, \text{mm}, \mu\text{m}$
Velocidade	$\text{m/s}, \text{mm/s}$
Aceleração	$\text{m/s}^2, \text{mm/s}^2$

Para a unidade de medida da aceleração muitas vezes é utilizada a constante gravitacional,  $g$ , onde 1  $g$ , equivale a  $9,81 \text{ m/s}^2$

## 2.5. Estudos realizados

A informação da aplicação de vibração na fundição ainda é muito escassa, visto que é um método inovador que ainda esta em fase de estudos. Durante a pesquisa foram encontrados três estudos efetuados com vibração mecânica, onde um deles relata a influência da vibração durante o vazamento, um outro descreve a influência da vibração durante a solidificação, e por fim, descreve a influência que a vibração tem nos fenômenos de transferência de calor entre o metal e o molde. Nenhum destes estudo descritos é vocacionado para a influência que a vibração pode ter sobre a fluidez do material, apenas o estudo descrito no subcapítulo 2.5.3, em que este fala da influência da vibração na transferência de calor do metal para o molde.

### 2.5.1. VIBRAÇÃO DURANTE O VAZAMENTO

O estudo realizado por um basto conjunto de autores [10], consistiu em efetuar o vazamento com a aplicação de vibração mecânica no processo de fundição por gravidade, utilizando o alumínio AC4C.

A vibração foi aplicada na parte lateral da moldação e o movimento oscilatório provocado pela vibração, é na horizontal.

O mecanismo utilizado neste estudo para fazer vibração, foi através do princípio da força centrífuga. Ou seja, foi colocada uma esfera dentro de um cilindro, em que este foi colocado em movimento rotacional através da pressão de ar. Isto permite que a frequência e a força centrífuga sejam facilmente controláveis, através do aumento ou diminuição da pressão de ar. Com a variação de ar foram conseguidas frequências entre os 0 e 157 Hz.

As condições de vazamento da moldação e da temperatura de fusão foram 300°C e 760°C, respectivamente. A vibração mecânica começou antes do vazamento e terminou 80 segundos após o vazamento, sendo que a frequência foi variando ao longo dos vazamentos.

Após efetuados vários teste com condições de vazamento descritas anteriormente, à exceção da frequência utilizada é possível tirar algumas conclusões. Ao aplicar a vibração mecânica durante o vazamento, verifica-se uma diminuição do tamanho de grão, especialmente na estrutura granular interna, no entanto a redução do grão não é linear com o aumento da frequência. Os defeitos internos de fundição tende a desaparecer com o aumento da vibração mecânica. As características mecânicas tais como, alongamento e resistência à tração são ligeiramente melhoradas.

### 2.5.2. VIBRAÇÃO DURANTE A SOLIDIFICAÇÃO

Segundo o estudo realizado pelos autores Zhao Zhong, Fan Zitian, Dong Xuanpu, Tang Bo, Pan Di and Li Jiqiang [11], onde este resumiu-se em aplicar vibração mecânica após o vazamento, isto é, durante a solidificação de uma liga de alumínio A356.

Este foi vazado com vácuo ao contrário do anterior. A vibração mecânica foi provocada na parte inferior da moldação, através de veios excêntricos. Como a excentricidade dos veios é conhecida, e o motor é de velocidade variável, foi possível obterem diferentes acelerações. Com este mecanismo obtiveram uma gama de frequências entre os 10 e os 60 Hz.

Quanto às condições de vazamento, apenas é dito que a temperatura de vazamento da liga de alumínio 356 é de 750°C.

Após o vazamento da liga, é aplicada a vibração. Esta vibração é aplicada por estágios, ou seja, o primeiro estágio tem a duração de 5-15 segundos, e é designado por estágio de arranque, onde existe uma amplitude variável. O segundo estágio tem uma duração de 450 segundos e é designado por vibração forçada, onde está numa fase totalmente controlável. O terceiro estágio é designado por paragem de vibração, onde todas as características e tempos são idênticos ao primeiro.

Depois de efetuados vários teste, alterando não só a frequência mas também a amplitude, dando origem a diferentes acelerações concluíram que, existem alterações no fundido. Ao aplicar vibração mecânica durante a solidificação, verifica-se um refinamento do grão, mas este refinamento apenas é favorável até acelerações de 4g. Dentro desta gama o fundido apresenta melhorias significativas a nível de defeitos internos, e um aumento da resistência à tração e alongamento.

A partir de acelerações superiores a 4 g, ocorre igualmente o refinamento de grão, mas também promove o aparecimento de poros devido á forte vibração.

Os resultados destes dois estudos indicam que a vibração mecânica proporciona uma melhoria não só da macroestrutura mas também na redução dos defeitos de fundição internos, até um certo nível de vibração.

### 2.5.3. INFLUÊNCIA DA VIBRAÇÃO NOS FENÔMENOS DE TRANSFERÊNCIAS DE CALOR

Como o subcapítulo 2.5.3 descreve, o estudo realizado por G. Chirita, I. Stefanescu, D. Soares, F.S. Silva [1] consistiu em descobrir e perceber a influência que a vibração mecânica provoca na transferência de calor entre o metal e o molde.

O material utilizado foi o Al Si 18 liga comercial, onde esta foi fundida a 800°C, e vertida para dentro de uma moldação permanente pré-aquecida até aos 130°C. A moldação está equipada com o sistema de vácuo, que foi utilizado em todos os estudos realizados, mas também por um sistema de vibração. A vibração é provocada através da excentricidade de um veio, que permite vibração com amplitude de 0,5 mm. O veio excêntrico está acoplado a um motor elétrico que permite ter frequências de vibração, de 0, 8 e 24 Hz.

A vibração mecânica é imposta no plano horizontal da moldação, durante o vazamento e a solidificação do material. A moldação tem ainda dois termopares do tipo K, colocados dentro de dois orifícios a 2 mm da superfície interna da moldação, na parte inferior e numa das laterais, de forma a adquirir as temperaturas durante o vazamento e a solidificação, perante os diferentes níveis de vibração.

Depois de efetuados todos os estudos foram obtidos os seguintes resultados:

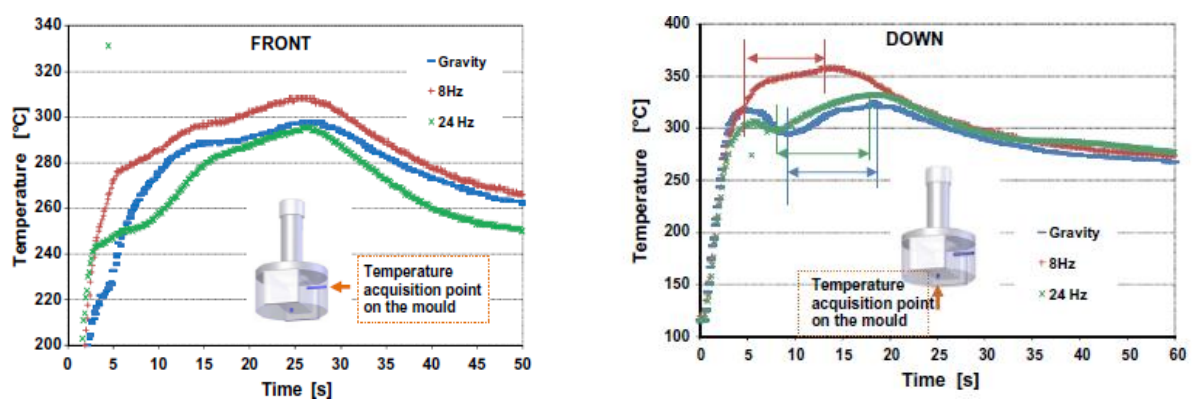


Figura 14 – Resultados obtidos nos dois termopares [1]

Como podemos ver na Figura 14, torna-se evidente que com a frequência de 8 Hz a transferência de calor para a moldação aumenta significativamente, nos dois gráficos. Para as frequências de 0 e 24 Hz, verifica-se que o ponto de início de solidificação é idêntico para os dois. No

decorrer da solidificação podemos verificar que no gráfico FRONT, a frequência de 24 Hz é a que apresenta menor transferência de calor para a moldação, o que leva a que este tenha um intervalo de solidificação superior a frequência de 0 Hz.

Em suma os resultados obtidos com 8 Hz são os que solidificam mais rapidamente, logo o menor intervalo de solidificação. Em comparação entre as frequências de 0 e 24 Hz, a transferência de calor é menor para uma frequência maior, ou seja, 24 Hz tem menor transferência de calor, logo um intervalo de solidificação maior.

Este estudo exhibe um mecanismo possível para explicar estes fenómenos de conjugação entre transferência de calor e vibração.

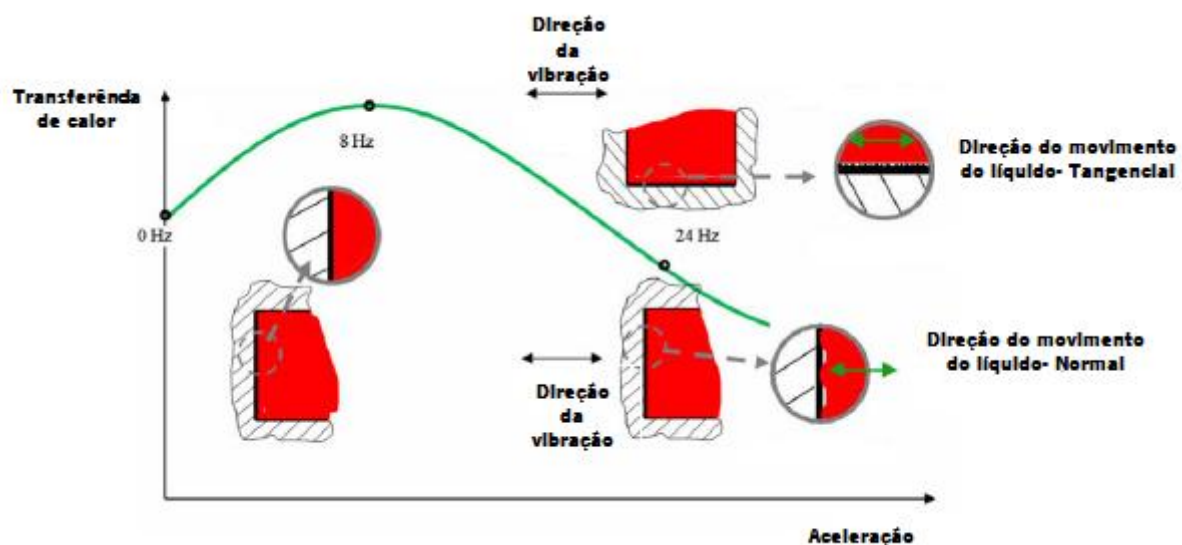


Figura 15 – Mecanismo proposto [1]

O mecanismo proposto neste estudo é evidenciado na Figura 15. Para frequências de 0 Hz no vazamento existe um contacto normal entre o metal líquido e a moldação, logo a transferência de calor e a velocidade de arrefecimento é normal.

Para frequências de 8 Hz, a vibração induz uma maior transferência de calor para a moldação, logo maior velocidade de arrefecimento, devido ao movimento alternado do líquido. A área de contacto com uma frequência de 8 Hz é idêntica a área de contacto com 0 Hz. No entanto como a convecção de calor é melhorada pelo movimento de vibração a temperatura do líquido na interface é maior, o que explica a maior transferência de calor para a moldação, obtidas nos gráficos da Figura 14.

Com frequência de vibração de 24 Hz, a vibração induz a uma maior transferência de calor do metal líquido para a moldação, devido ao rápido movimento do metal. No entanto, a aceleração relativa entre o metal líquido e a moldação parece ser suficientemente elevada de modo a criar uma perda de

contacto com a moldação (baixa pressão nas zonas da interface metal líquido e moldação) (Front position) e, eventualmente, até mesmo bolhas de baixa pressão, como aqueles originados em cavitação. Esta situação ocorre, quando a tensão superficial (Parede líquido-moldação) não é suficientemente baixa, de forma a manter a superfície em contato com altas taxas de aceleração (frequência \* amplitude). A perda de contacto significa mudar a transferência de calor de um modo totalmente condutor para condutor mais convectivo. Como a transferência de calor por convecção é muito mais baixa do que a transferência de calor por condução, a transferência de calor, assim como a taxa de solidificação baixa substancialmente.

Um mecanismo diferente pode ocorrer na posição para baixo (Down position Figura 15), isto porque existe uma perda de contacto devido ao movimento tangencial do líquido.

Esta perda de contacto é devido ao movimento do líquido e efeito da rugosidade. Isto significa que a vibração pode ser benéfica, bem como prejudicial dependendo do grau de aceleração entre o metal líquido, microestrutura e tensão de superfície do metal líquido e da moldação.

Em suma, a vibração afeta:

- As taxas de solidificação e as suas características
- Tem influência sobre as propriedades mecânicas, sendo que esta influência parece estar relacionada com os fenómenos de transferência de calor
- Vibração aumenta a transferência de calor no líquido a partir de determinada aceleração





## **PARTE II - PROJECTO DO DISPOSITIVO DE VIBRAÇÃO**

### 3. PROJECTO DO DISPOSITIVO DE VIBRAÇÃO

Antes de fazer os testes para verificar a influência da vibração nos fundidos, foi necessário projetar um dispositivo que provoca-se vibração na moldação. No laboratório de materiais da Universidade do Minho, existe uma máquina de fundição (*INDUTHERM* Figura 16), que permite vaziar peças com pressão, vácuo e também por gravidade, mas não com vibração.



Figura 16 – Máquina INDUTHERM

Como o objetivo é provocar vibração na moldação com uma gama de frequência entre os 20 e 50 Hz, teve de ser desenvolvido um dispositivo que se acopla-se na câmara da *INDUTHERM* (Figura 17), sem embaraçar posteriores vazamentos em condições de não vibração. Para tal, foi essencial efetuar um estudo da *INDUTHERM*, e das possibilidades que existiam em torno da mesma para a adaptação, para posteriormente desenvolver uma máquina de vibração que facilmente fosse introduzida e retirada da camara.



Figura 17 – Camara da INDUTHERM

### 3.1. Levantamento das medidas de atravancamento

Como podemos ver na Figura 17, o espaço que se possui para aplicar a máquina de vibração é muito reduzido, visto que depois de introduzida dentro da câmara, ainda tem de haver espaço para colocar a moldação.

A câmara tem um diâmetro de 145 mm, uma profundidade de 280 mm, e o chassi tem uma altura de 150 mm, logo o espaço ocupado pelo dispositivo de vibração não poderia ultrapassar os 130 mm.

### 3.2. Solução adotada

Com todos estes obstáculos, e após uma longa pesquisa, a solução adotada passou por aplicar um motor de aspirador Figura 18, pois este apresentava as características necessárias para aplicar na *INDUTHERM*, visto que tem uma altura de 100 mm e um diâmetro de sensivelmente 128 mm.



Figura 18 – Motor de aspirador

Como já dito, a frequência necessária era entre 20 e 50 Hz. Esta é a quantidade de vezes que um fenómeno ocorre num determinado período de tempo, que é medida em Hertz, e que equivale a um ciclo por segundo, ou seja, rotações por segundo (rps).

A velocidade de rotação é medida em rotações por minuto, logo se traduzirmos as rotações por minuto em rotações por segundo, teremos a frequência e vice versa.

Assim sendo 20 e 50 Hz dá aproximadamente 1200 e 3000 rpm respetivamente. A velocidade de rotação do motor do aspirador foi medida, através de um tacómetro digital, onde foi possível ler, 10000 rpm na sua velocidade mínima, e na velocidade máxima foi de 28000 rpm, pelo que foi obrigatório reduzir a velocidade pois a frequência obtida com estas velocidades era de 166 e 466 Hz respetivamente. Esta variação de velocidade é conseguida com o variador de velocidade do próprio aspirador.

### 3.3. Redutor de velocidade

Para reduzir a velocidade de rotação foi necessário recorrer a conjunto de engrenagens, tais como, roda dentada e um veio com dentado para acoplar no veio de saída do motor de aspirador. Como o fabrico destes componentes é complexo devido aos dentes da roda dentada, decidiu-se utilizar os componentes de um berbequim, visto que este contém os componentes pretendidos.

O berbequim utiliza uma transmissão que é constituída por um parafuso sem-fim e uma roda dentada helicoidal. Estas transmissões são utilizadas para eixos reversos e para relações de transmissão de 1 até 100, sendo estas também as mais silenciosas e com maior capacidade para amortecer vibrações.

Antes de passar para a fase de adaptação dos componentes do berbequim, foi necessário calcular a velocidade de saída da roda dentada helicoidal, de forma a garantir que esta alcançava a velocidade pretendida.

Segundo a expressão [12]:

$$N_c = \frac{NP \times Ne}{Z_c}$$

Equação 9: Velocidade de saída da roda dentada

Em que:

- $N_c$ - rpm da roda dentada helicoidal
- $NP$ - rpm do veio com dentado helicoidal
- $Ne$ - n° de entradas do parafuso sem-fim
- $Z_c$ - n° de dentes da coroa

Aplicando a expressão temos:

- $N_c = \frac{10000 \times 4}{33} = 1212 \text{ rpm}$ , para a velocidade de rotação mínima,
- $N_c = \frac{28000 \times 4}{33} = 3393 \text{ rpm}$ , para a sua velocidade máxima.

Podemos assim verificar, que a roda dentada helicoidal e o parafuso sem-fim, são suficientes para garantir a velocidade pretendida.

Na Figura 19, estão representados os dois componentes utilizados do berbequim. O parafuso sem-fim foi acoplado ao motor do aspirador, que por sua vez irá dar movimento a roda dentada helicoidal. Na Figura 18, podemos ver o parafuso sem-fim, já acoplado no motor de aspirador.

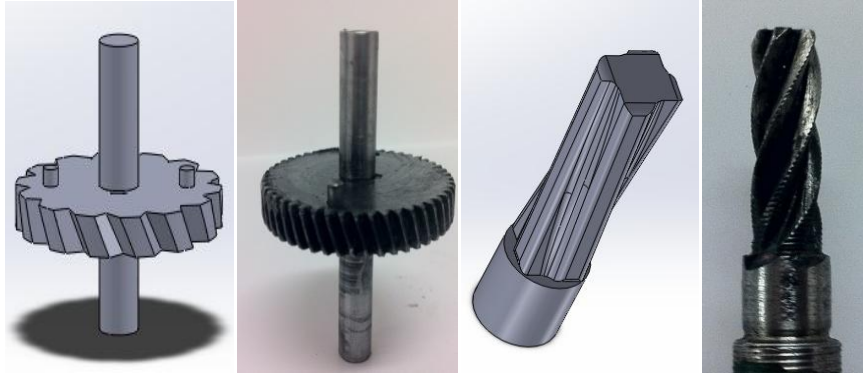


Figura 19 – Roda dentada helicoidal, e parafuso sem fim

Após os dois componentes engrenados e colocados em movimento de rotação, obtemos uma relação de transmissão, segundo a expressão [12]:

$$i_{cp} = \frac{Nc}{Np} = \frac{33}{4} = 8.25$$

Equação 10: Relação de transmissão

Onde  $i_{cp}$ , é a relação de transmissão entre o parafuso sem-fim e a roda dentada helicoidal, consegue-se obter uma relação de transmissão de 1:8, ou seja, a velocidade da roda dentada helicoidal é 8 vezes inferior em relação ao fuso e varia assim entre 1212 e as 3393 rpm, que é a velocidade de rotação pretendida.

### 3.4. Fixação dos componentes ao motor

Para fixar os dois componentes ao motor de aspirador de maneira a que os dentes do parafuso sem-fim e da roda dentada helicoidal estejam sempre em contacto, de forma a não perder o movimento de rotação e por ventura provocar danos, foi projetado e fabricado um componente ao qual foi dado o nome de barra fixadora Figura 20. Esta apenas permite o movimento de rotação ao veio da roda dentada helicoidal e do parafuso sem fim. A barra fixadora tem um rolamento como podemos ver na Figura 20 para facilitar o movimento de rotação e reduzir folgas existentes.

Na Figura 21, temos a montagem do conjunto de redução com o motor de aspirador.

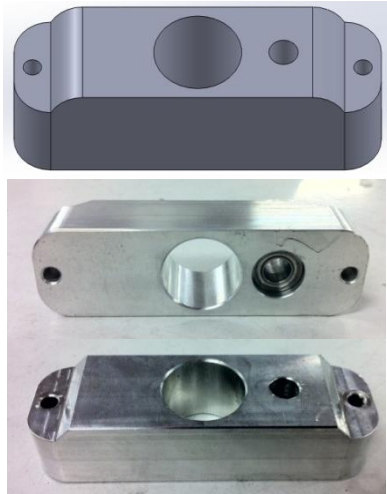


Figura 20 – Barra fixadora

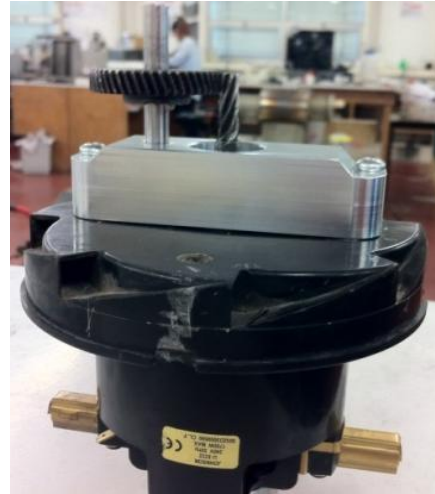


Figura 21 – Motor de aspirador com o redutor montado

Esta é fixa ao motor através de dois parafusos já existentes no motor, colocados na extremidade da peça como vemos na Figura 20 e Figura 21.

### 3.5. Criação da vibração

#### 3.5.1. SUPERFÍCIE DE VIBRAÇÃO

Após a redução da velocidade para as rotações por minuto pretendidas, e fixados os componentes, foi necessário desenvolver um sistema que cria-se vibração, a partir da roda dentada helicoidal, pois esta é que tinha a velocidade desejada.

A solução adotada passou por criar superfícies com determinadas inclinações, para acoplar á roda dentada, Figura 22. Estas foram criadas para que o processo de substituição fosse rápido e ao mesmo tempo fácil.

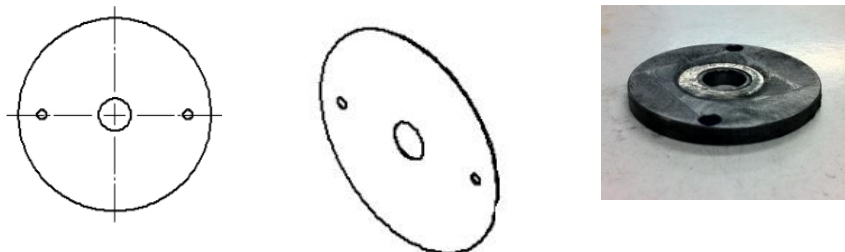


Figura 22 – Superfície com inclinação

Para além de o processo de troca se tornar fácil e rápido, com estas superfícies conseguimos ainda garantir a amplitude pretendida. Na Figura 22, estão representados desenhos da superfície criada, mas também uma imagem real, onde esta vai desde a superfície onde a inclinação é de  $0^\circ$  até uma inclinação de  $0.47^\circ$ , o que se traduz numa amplitude de 0.3 mm. Esta amplitude irá traduzir-se em vibração quando o apalpador, descrito no capítulo seguinte, estiver em contato com a superfície em rotação. Este irá fazer o movimento de vaivém desde a inclinação de  $0^\circ$  aos  $0.47^\circ$ , provocando a vibração pretendida.

Na Tabela 4, estão representados dados, como amplitude e a inclinação, obtidas através das diferentes superfícies criadas.

Tabela 4 – Inclinação e amplitude originadas

Amplitude (mm)	Inclinação ( $^\circ$ )
0.3	0.47
0.6	0.94
0.9	1.43

Para fixar a superfície à roda dentada, de forma a que esta acompanhe o movimento de rotação, foram colocados dois pinos na roda dentada helicoidal, como mostra a Figura 23, e por conseguinte as superfícies com os furos de forma a encaixarem na perfeição. Esta fixação não permite que a superfície criada deslize em relação à roda dentada, quando submetida uma massa sobre ela (Figura 24).

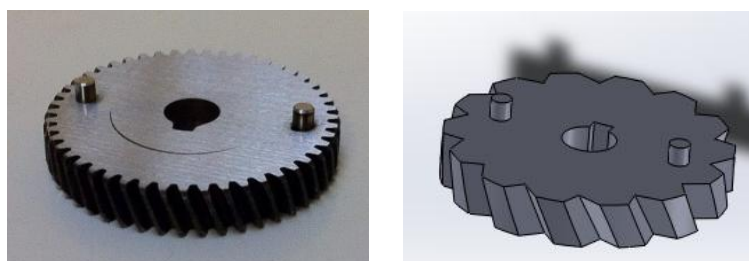


Figura 23 – Roda dentada helicoidal com os pinos



Figura 24 – Roda dentada helicoidal acoplada com a superfície

### 3.5.2. APALPADOR/ SUPORTE DE APALPADOR

O apalpador nesta máquina não passa de um simples rolamento, ao qual foi dado o nome de apalpador, devido às funções que este desempenha.

Os apalpadores utilizados em MMC (Máquina de medição por coordenadas), tem como objetivo fornecer um sinal proporcional ao deslocamento do apalpador após o contacto com a peça, transmitindo para um processador as coordenadas lidas, que por sua vez as traduz em informação perceptível (medição).

Neste caso o apalpador desempenha funções idênticas, ou seja, este quando entra em contacto com a superfície, transmite um sinal proporcional à superfície, que por conseguinte com o movimento de rotação, traduz a informação na forma de vibração.

Após pensado o apalpador, foi imprescindível criar um suporte que efetua-se a ligação entre o apalpador e a cabeça (descrita no capítulo seguinte). Este tem como principal objetivo transmitir o movimento do apalpador para a cabeça, que é onde se pretende que ocorra a vibração.

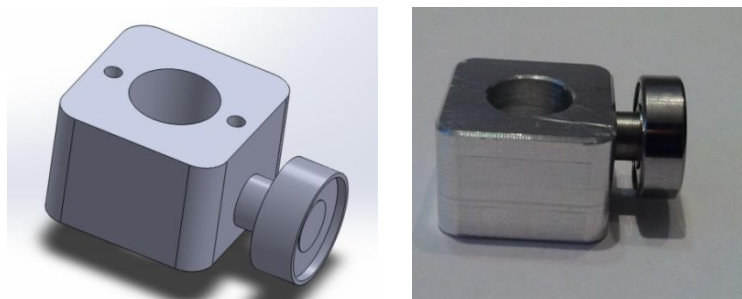


Figura 25 – Apalpador acoplado no suporte



Como podemos ver na Figura 25, o suporte tem um furo no centro. Este furo foi feito para orientar o parafuso sem fim (Figura 26), e assim garantir que todo o sistema está centrado e guiado.

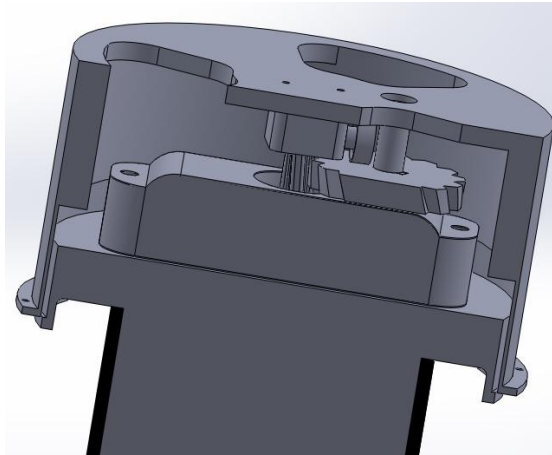


Figura 26 – Modelo virtual 3D, guiamento do parafuso sem fim

Em suma, o apalpador segue os movimentos da superfície que se encontra em rotação, traduzindo esse movimento em vibração, que através do suporte transmite a vibração para a cabeça.

### 3.6. Cabeça

Como já dito anteriormente, o suporte do apalpador é que transmite a vibração para a cabeça. Este está acoplado à cabeça através de dois parafusos, e localizado no centro da cabeça, de forma a garantir que a vibração não é deslocalizada, Figura 27.

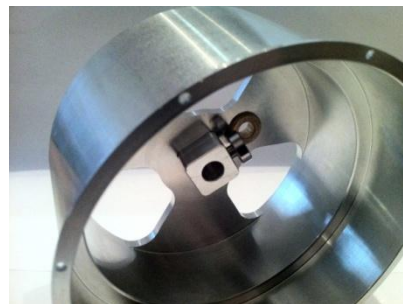


Figura 27 – Cabeça, acoplamento do suporte e apalpador

Para desenvolver a cabeça foi necessário ter alguns aspetos em conta, tais como:

- Facilidade de montagem e desmontagem
- Possibilidade de ver todos os elementos, que fazem a redução de velocidade e a vibração

- Garantir a concentricidade de todos os elementos que provocam a vibração e redução de velocidade, quando ocorrer o funcionamento total da máquina, de modo a que as engrenagens não sofram qualquer deslocação quando submetidas a cargas.
- Suporte para colocar as molas
- Suporte para a moldação

Com todas as considerações descritas, foi possível chegar a peça final demonstrada na Figura 28, sendo que esta para além de ter facilidade na montagem, tinha de ser ao mesmo tempo funcional.

Como podemos ver novamente na Figura 28, a cabeça contém três orifícios na parte superior, para facilitar a visualização dos elementos que a constitui. Estes foram necessários para garantir que todos os elementos engrenavam e que tudo encaixava conforme o previsto. Sem os orifícios não era possível garantir que tudo estava dentro da normalidade, podendo esta correr o risco de se desintegrar.

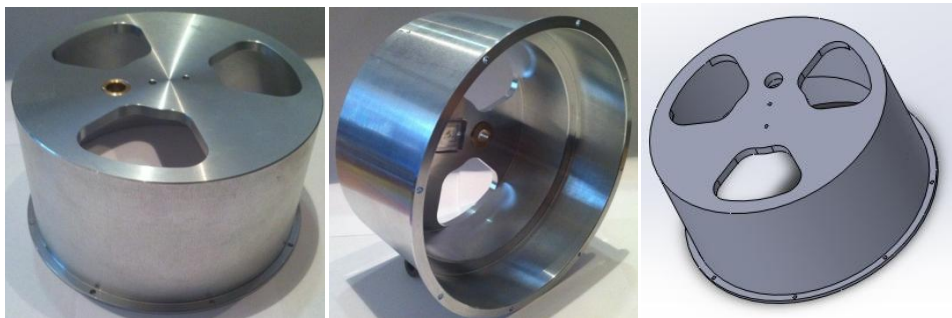


Figura 28 – Cabeça, modelo virtual e real

No capítulo anterior, já foi dito que o suporte do apalpador, não só serve de suporte para o apalpador mas também de guia para o parafuso sem-fim. Contudo a concentricidade de todos os elementos ainda não estava garantida, visto que apenas estava garantida no parafuso sem-fim. Para garantir a concentricidade da roda dentada helicoidal, criou-se um furo que orienta o veio que esta acoplado na roda dentada, como podemos ver na Figura 29.

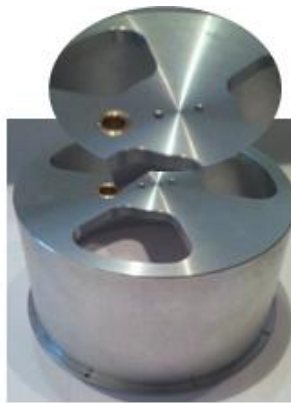


Figura 29 – Furo de guiamento para o veio da roda dentada helicoidal

Este furo poderia não ser vazante, ou seja, poderia não ser um furo de superfície a superfície, mas criou-se com o intuito de medir a velocidade de rotação através do mesmo, com o tacómetro digital.

### 3.7. Fixação do dispositivo de vibração à *Indutherm*

Para acoplar o dispositivo de vibração, foi feito um suporte que encaixa-se na máquina *INDUTHERM* e no motor de aspirador.



Figura 30 – Cilindro de ligação



Figura 31 – Veio da INDUTHERM

Como vemos na Figura 30, a solução passou por criar um cilindro de ligação com encaixes para o motor de aspirador e para o veio da *INDUTHERM*, indicado a vermelho na Figura 31, de maneira a que a máquina de vibração fique acoplada e ao mesmo tempo, capaz de seguir o movimento do veio.

### 3.8. Dispositivo final

Como podemos ver na Figura 32, temos a máquina de vibração finalizada, isto é, todos os componentes estão devidamente montados, e aparentemente tudo como idealizado. Antes de a colocar

dentro da câmara da *INDUTHERM*, foi necessário testar se tudo estava dentro do previsto, isto é, verificar se a velocidade conseguida depois de colocada a redução era a pretendida, mas também se o apalpador mantinha um contacto constante, com as diferentes superfícies criadas, de forma a obter uma vibração constante com as diferentes amplitudes. Por fim garantir a segurança da *INDUTHERM*, mas também do que está em seu redor.

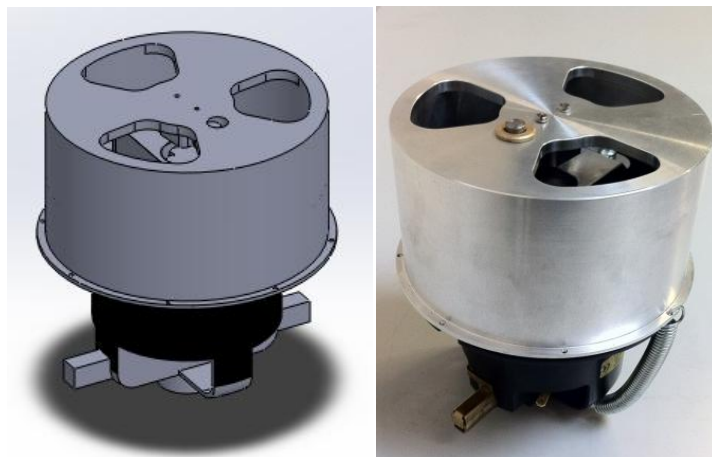


Figura 32 – Dispositivo de vibração final

Após o primeiro teste do dispositivo constata-mos que o motor de aspirador tinha uma velocidade excessiva para a engrenagem, esta mostrou não ser suficientemente robusta para a velocidade do motor, mas também para todo o corpo da máquina.

Para tal houve a necessidade de colocar um variador de potência que permite-se uma gama mais vasta, do que aquele que já estava acoplado no motor. Na Figura 33, está representado o variador de potência adotado, onde este permite variar a potência do motor desde o seu mínimo até ao seu máximo, assim como controlar o seu arranque, ou seja, arranque espontâneo ou progressivo.



Figura 33 – Variador de potência

Depois de montado o variador, optou-se por um arranque progressivo para que o engrenamento seja constante, de forma a não danificar a engrenagem.

Como mencionado anteriormente o motor do aspirador tinha uma velocidade excessiva para a engrenagem, logo a velocidade de saída (veio da roda dentada helicoidal) calculada na Equação 9, não foi conseguida, pois caso contrário o dispositivo corria o risco de se desintegrar. A nova velocidade encontrada foi na gama das 0 a 1500 rpm, medida através de um tacómetro digital. Dentro desta gama é possível garantir o bom funcionamento, isto é, o dispositivo de vibração tem um comportamento normal, e o contacto do apalpador é constante. A partir desta velocidade o bom funcionamento não está garantido devido às engrenagens.

Com os testes efetuados constatou-se também, que o contacto da superfície com o apalpador, é constante com a superfície de 0.3 mm, pois é a amplitude de menor valor, o que permite tempo de recuperação para o apalpador. Com as superfícies de 0.6 e 0.9 mm, o contacto não era garantido, pois como a amplitude era maior e o apalpador não tinha tempo de recuperar para a posição inicial. Posto isto, a amplitude utilizada durante os estudos foi aquela que garante a vibração constante.

### 3.9. Acoplamento na INDUTHERM

Garantido o bom funcionamento do dispositivo de vibração, apenas restou acopla-lo na camara da *INDUTHERM*, e posteriormente testar o funcionamento em conjunto. Como podemos ver na Figura 34, os dois dispositivos já se encontram acopladas.



Figura 34 – Acoplamento do dispositivo de vibração na camara da INDUTHERM

O único inconveniente encontrado após a montagem, foi a altura do dispositivo de vibração, pois esta não poderia ultrapassar os 130 mm como dito anteriormente, para que o chassi da moldação fica-se na totalidade dentro da câmara. Esta altura não foi conseguida, pois o chassi teve de ser cortado cerca de 50 mm.

Na fase posterior ao acoplamento, foi testado o funcionamento do conjunto, obtendo resultados bastante satisfatórios, conseguindo assim a vibração tal como pretendida.

Os desenhos técnicos das peças produzidas são apresentados em anexo.

### **3.10. Padronização da velocidade/ Frequência de vibração**

O principal objetivo deste estudo é verificar a influência da vibração na fluidez do metal. Para tal foi necessário escolher os níveis de vibração que iriam se utilizados ao longo do trabalho. Como mencionado no capítulo 3.8 a velocidade máxima conseguida rondava as 1500 rpm, logo no máximo obtia-se uma frequência de 25Hz.

Depois de algumas experiências foi decidido que a frequência de vibração iria ter 5 níveis, sendo eles 0, 2, 10, 16, 20 e 25 Hz. Estas frequências são conseguidas através da variação da velocidade do motor, que após a introdução do variador de potência se tornou mais fácil controlar essas velocidades.

As velocidades de rotação foram medidas através do tacómetro digital, e padronizadas no variador de potência, ou seja, estas velocidades foram fixadas numa determinada posição do variador, para assim obter sempre a mesma velocidade/ frequência. Na Tabela 5 estão representadas as velocidades padronizadas, acelerações e as respetivas frequências. De salientar que a vibração produzida é na vertical e na parte inferior da moldação como está exemplificado na Figura 35.

Tabela 5 – Velocidades padronizadas, aceleração e respectivas frequências

Velocidade (rpm)	0	130	600	1000	1200	1500
Frequência (Hz)	0	2	10	16	20	25
Aceleração (m/s <sup>2</sup> )	0	0.047	1.18	3.03	4.73	7.39
Aceleração (g)	0	0.004	0.12	0.30	0.48	0.75

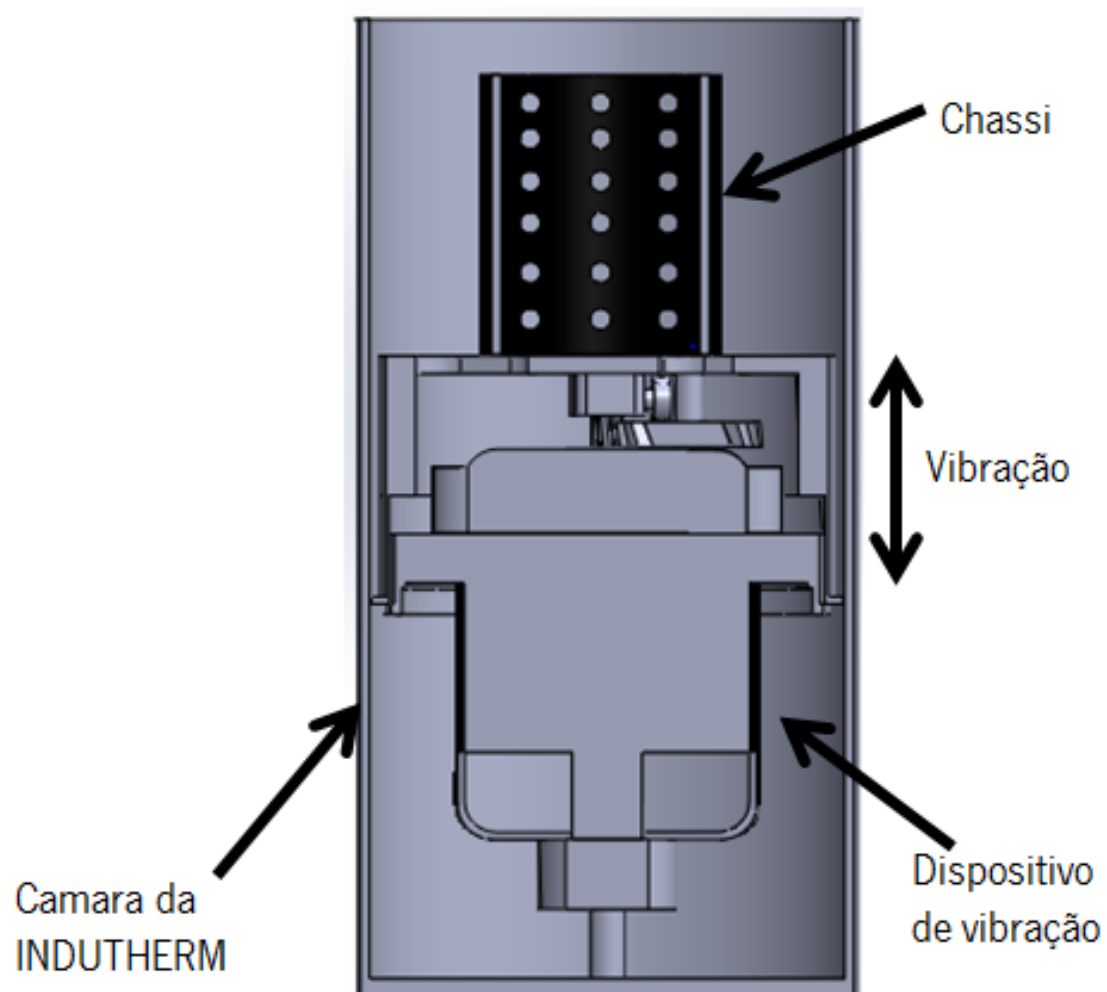


Figura 35 – Imposição da vibração





### **PARTE III - PROCESSO EXPERIMENTAL**

## 4. PROCESSO EXPERIMENTAL

### 4.1. Produção das amostras e criação da rugosidade

As amostras criadas são uns simples paralelepípedos com as seguintes dimensões: 2 mm de largura por 70mm de comprimento, e 0.3, 0.6, mm de espessura.

Estas foram criadas em cera sintética com as dimensões mencionadas anteriormente. Como o objetivo é verificar a influência da vibração na fluidez do metal e neste caso com a aplicação da rugosidade nas superfícies de maneira a variar o tipo de amostras, foi necessário criar a rugosidade na cera. Essa rugosidade foi criada através do jateamento de areia como mostra a Figura 36.



Figura 36 – Jato de areia

As areias utilizadas apresentavam diferentes granulometrias, para assim criar diferentes rugosidades, onde posteriormente seria medida.

Após o início da criação da rugosidade nas superfícies, foi verificado que a areia destruía parcialmente as amostras, e a rugosidade criada não era homogênea. Para além da destruição parcial das amostras, não era possível medir a rugosidade média das mesmas com o rugosímetro presente no laboratório de metrologia devido à plasticidade da cera. Outro inconveniente encontrado, foi a ductilidade da cera, que devido ao comprimento das amostras torna-se muito dúctil e impossibilita uma das fases posteriores, montagem da árvore.

Com todos estes inconvenientes foi necessário arranjar um material que fosse possível criar e medir a rugosidade, e ao mesmo tempo que fosse passível de ser soldado com cera, e com uma temperatura de ebulição não muito elevada.

Após alguma pesquisa foi decidido utilizar um polímero, que é bem conhecido no dia-a-dia académico. O polímero então utilizado foi o acetato como apresenta a Figura 37.

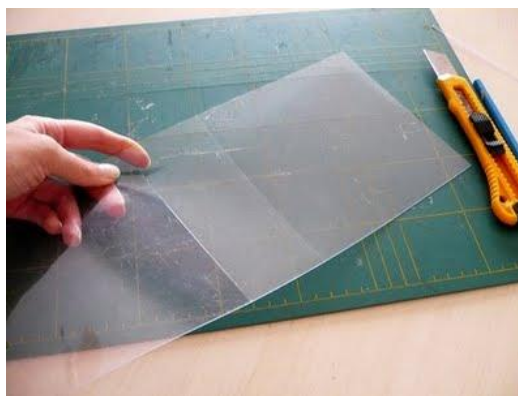


Figura 37 – Folha de acetato

A escolha recaiu sobre este, porque apresenta uma dureza bem superior à da cera sintética, logo permite criar e medir a rugosidade sem ocorrer a destruição das amostras, e por outro lado tem uma temperatura de ebulição que ronda os 710°C. Esta temperatura de ebulição foi validada, colocando uma amostra de acetato dentro de uma mufla e elevando a temperatura até a sua temperatura de ebulição, onde se verificou a sua evaporação total.

Depois de selecionado o polímero a utilizar, passamos para a etapa seguinte, que consistiu em criar as amostras para depois criar a rugosidade. Estas foram criadas com o comprimento, largura e espessura, já descritas. O polímero utilizado tem originalmente 0,3 mm de espessura. Como o pretendido era 0,3 e 0,6 mm de espessura, optou-se por colar as amostras umas sobre as outras, de modo a perfazer os 0,6 mm, ou seja, a amostra de 0,6 mm tem 2 amostras coladas uma sobre a outra. As de 0,3 mm, apenas têm uma amostra, pois já tem a espessura pretendida. Na Figura 38, está representada uma amostra de 0,3 mm.



Figura 38 – Amostra de 0.3 mm

Finalizadas as amostras, foi necessário criar a rugosidade nas mesmas através do jato de areia. Como já dito anteriormente, a areia apresentavam diferente granulometria, de forma a obter rugosidades diferentes. Nestas novas amostras a rugosidade foi criada sem os problemas encontrados na cera sintética, isto é, a rugosidade foi criada e medida sem ocorrer a destruição parcial das mesmas. Na Tabela 6, estão mencionados os diferentes tamanhos de grão, e o valor da rugosidade média obtida nas amostras. De salientar que os valores da rugosidade são representativos.

Tabela 6 – Rugosidade média média obtida nas amostras

<b>Areia</b>	<b>Espessura 0,3 (mm)</b>	<b>Espessura 0,6 (mm)</b>	<b>Desvio de padrão</b>
<b>0</b>	<b>0.03 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>0.03 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>0.01 <math>\mu\text{m}</math></b>
<b>R 30</b>	<b>2,6 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>2,6 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>0.1 <math>\mu\text{m}</math></b>
<b>R 100</b>	<b>3 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>3 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>0.2 <math>\mu\text{m}</math></b>

#### 4.2. Montagem da árvore/cacho

A montagem da árvore consiste em soldar as amostra descritas no capítulo anterior, no canal de enchimento, que é produzido em cera sintética. Esta soldadura é efetuada através de um modelador de cera Figura 39, que basicamente é uma resistência térmica que passa a cera do estado sólido para líquido, no local onde entra em contacto. Após a cera ficar no estado líquido no local pretendido, introduzimos, parte das amostras que pretendemos que fique soldada ao canal de enchimento. Passados alguns segundos a cera volta ao seu estado sólido soldando assim as amostras ao canal de enchimento.



Figura 39 – Modelador de cera

Cada árvore montada para o estudo, continha 6 amostras distribuídas pelo canal de enchimento como demonstra a Figura 40, sendo que cada coluna de amostras representa um tipo de rugosidade. Ou seja, uma coluna tem a mesma rugosidade para as duas amostras que a contém.

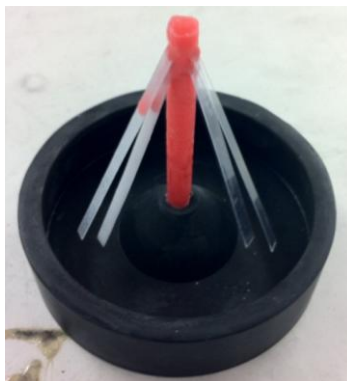


Figura 40 – Árvore/ Cacho montado

### 4.3. Fabrico da moldação

#### 4.3.1. INTRODUÇÃO DA ÁRVORE DENTRO DO CILINDRO/CHASSI



Figura 41 – Árvore dentro do chassi

Após a montagem da árvore, procedeu-se á introdução desta dentro do chassi, como mostra a Figura 41, sem prejudicar a sua estrutura, pois o produto final está dependente do molde. A árvore é colocada como dito anteriormente de forma invertida sobre uma borracha vedante que tem a forma da bacia de enchimento/alimentador. Posteriormente é colocado o chassi, a envolver todo o cacho.

Colocada a árvore dentro do chassi, este foi selado para não permitir numa fase posterior que o cerâmico possa fluir pelos orifícios, visto que este se encontra em estado pastoso, Figura 42



Figura 42 – Chassi selado

### 4.3.2. FABRICO DO MATERIAL CERÂMICO

Existem vários tipos de materiais cerâmicos no mercado. O cerâmico utilizado durante as experiências é o gesso. Como sabemos o gesso vem em pó, logo para ganhar a forma pastosa adiciona-se um elemento ligante, que é a água. Esta mistura é feita com a adição do material cerâmico ao elemento aglomerante, e misturado com um misturador apropriado. As quantidades utilizadas para fazer uma mistura homogeneia foram: 720 gramas de gesso em pó, e 290 gramas de água.



Figura 43 – Produção da mistura

Depois de criada a mistura Figura 43, em que os dois materiais são dissolvidos, estes passam por uma etapa para retirar todas as bolhas de hidrogénio, existentes na mistura, que poderiam tornar-se em porosidades na peça final. Essa etapa é feita numa máquina de vácuo e vibração presente no

laboratório de fundição do Departamento de Engenharia Mecânica, como demonstra a Figura 44. De salientar que esta operação não deve exceder os 120 segundos de duração.



Figura 44 – Máquina de vácuo

Posto isto, o gesso está preparado para ser introduzido no chassi e cobrir a árvore, de modo a que este crie uma moldação igual ao molde. A mistura deve ser vazada para dentro da moldação o mais rápido possível, pois esta começa a solidificar rapidamente.



Figura 45 – Vazamento da mistura

Na fase posterior ao vazamento da mistura (Figura 45) a moldação é submetida novamente à máquina de vácuo, para retirar o hidrogénio proveniente do vazamento da mistura para dentro do chassi, através do arrastamento. Esta etapa tem uma duração de 90 segundos.

Depois de passados os 90 segundos, a moldação está pronta como mostra a Figura 46. Esta tem de permanecer estática durante cerca de 2 horas de modo a solidificar em condições normais, e assim produzir uma moldação de qualidade pretendida.



Figura 46 – Moldação final

Passadas as 2 horas, a moldação está preparada para sofrer o tratamento térmico necessário.

#### 4.4. Ciclo térmico

Depois de passadas as 2 horas, a moldação é submetida a um tratamento térmico numa mufla ou forno elétrico Figura 47, em cima de um tabuleiro metálico de modo a aproveitar a cera que posteriormente é retirada dentro da moldação.

Este tratamento térmico é para eliminar a água presente no gesso, que é proveniente da mistura. A água como sabemos tem ponto de ebulição  $100^{\circ}\text{C}$ , logo toda a moldação tem que estar homogeneamente a pelo menos  $105^{\circ}\text{C}$ , para garantirmos a remoção total da água livre, assim como a que está quimicamente ligada.



Figura 47 – Mufla ou forno

O tratamento térmico é também, para garantir todas as propriedades mecânicas pretendidas, de modo a que este permita o seu manuseamento, e que suporte todas as solicitações mecânicas sendo elas:

- Peso do próprio metal
- Erosão do metal



- Impacto do metal durante o vazamento nas paredes das cavidades
- Pressão metalostática do metal
- Choque térmico devido ao gradiente de temperatura
- Pressões devido á expansão volumétrico

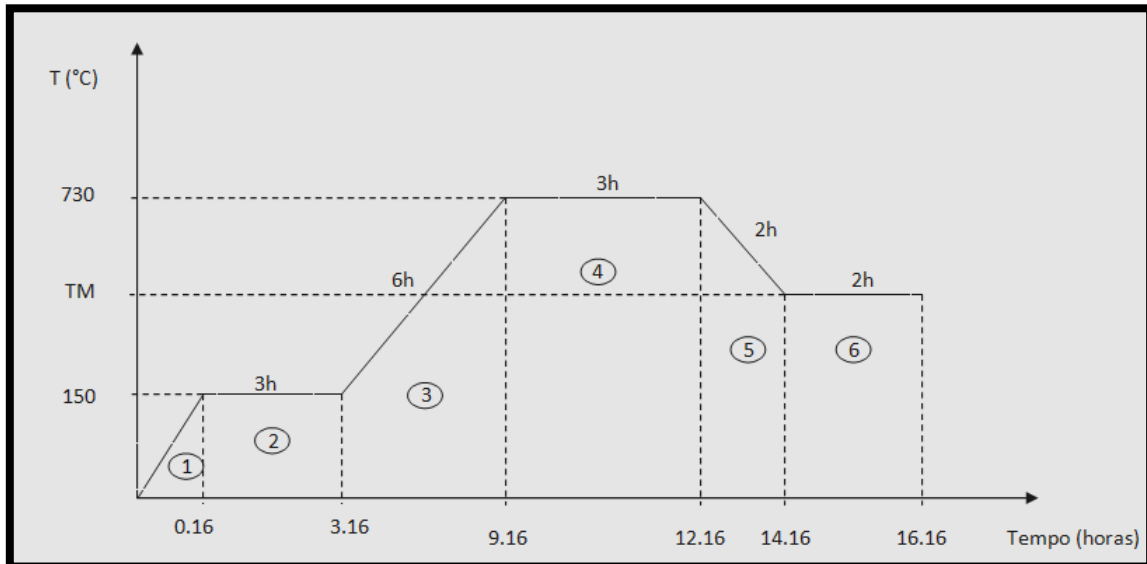


Figura 48 – Ciclo térmico utilizado no caso de estudo (TM: Temperatura da moldação)

O tratamento térmico aplicado no caso de estudo, está demonstrado na Figura 48. De salientar que os tratamentos térmicos diferenciam-se pelos diferentes tipos de gesso, isto é, o ciclo é diferente para diferentes tipos de constituições de gesso.

- **1ª Etapa: Eliminação da água presente na moldação**

Na primeira etapa, temos uma subida de temperatura muito rápida até aos 150°C, em aproximadamente 0.16 horas ( $\pm 10$  minutos)

- **2ª Etapa: Eliminação da cera**

Esta etapa, tem um estágio de 3 horas, a 150°C para que a temperatura da moldação esteja homogénea, de modo a ocorrer a remoção da cera presente na moldação

- **3ª Etapa: Expansão térmica do molde**

Nesta fase é onde ocorre a expansão térmica, isto é, ocorre um aumento de temperatura dos 150 até aos 730°C, durante cerca de 6 horas, ou seja, aquecimento muito lento, de modo a provocar a sinterização do gesso e assim melhorar a resistência mecânica

- **4ª Etapa: Eliminação completa da cera**

Ocorre a eliminação completa da cera assim como o acetato que tem como ponto de ebulição 710°C, logo subimos a temperatura até aos 730°C para garantir toda a sua ebulição. Este tem um estágio de 3 horas para assegurar a eliminação total.

- **5ª Etapa: Redução da temperatura**

Nesta etapa ocorre uma diminuição de temperatura lenta, para não ocorrer nenhum tratamento térmico na moldação, que não seja pretendido. A temperatura desce até a temperatura que foi designada por TM (temperatura da moldação)

- **6ª Etapa: Homogeneizar a temperatura da moldação**

Por fim, é feito um estágio de 2 horas para homogeneizar a temperatura na moldação, de modo a garantir a mesma temperatura na sua totalidade, no momento do vazamento (TM = 350°C)

Depois de terminado o tratamento térmico, a moldação, é transportada o mais rápido possível para a câmara da máquina *INDUTHERM*, para que esta não sofra um decréscimo elevado de temperatura por trocas com o ambiente, e provoque variações indesejáveis nos fundidos. Isto devido ao aumento da diferença de temperatura que pode existir entre a sua temperatura e a temperatura do metal. De forma a não ocorrer elevadas transferências de calor entre o ambiente e a moldação, esta é colocada na camara da *INDUTHERM*, onde posteriormente é vedada, de forma a reduzir as trocas de calor, e assim manter a temperatura da moldação.

Todas as etapas descritas ao longo deste capítulo 4, são executadas para todas as moldações/ensaios que foram feitos, existindo a exceção do capítulo 4.1, que são feitas todas as amostras de uma só vez, para o decorrer de todo o trabalho.

## **4.5. Material utilizado**

### **4.5.1. CONSTITUIÇÃO E COMPOSIÇÃO DA LIGA**

No processo de fundição é essencial escolher o material a utilizar, que mais se adequa ao processo que vamos usar. O material utilizado durante este estudo foi uma liga de alumínio A356. Este foi selecionado, porque é o que mais se adequa a vários processos de fundição, pois pertence à série

300 do alumínio. Esta série é caracterizada por ser a que apresenta melhores características para os vários processos de fundição, porque apresenta o silício como liga e em quantidades entre o 5 e 12 % [13]. Este é o elemento de liga mais importante, pois melhora as características mecânicas, tais como elevada resistência à corrosão, aumenta a fluidez do metal líquido, assim como a sua capacidade de alimentação do molde.

A liga de alumínio A356 utilizada é constituída por 7% de Si, 90% de alumínio, 0.20 Cu, 0.35 Mg, 0.10 Mn, 0.20 Fe, e por fim 0.10 Zn, e apresenta uma densidade de aproximadamente 2.68 g/cm<sup>3</sup>. Esta tem uma composição hipoeutética, pois apresenta-se “à esquerda do ponto eutético. O ponto eutético é um ponto determinado pela composição e temperaturas eutéticas. A composição eutética é a composição da fase líquida que, à temperatura eutética, reage para formar duas novas fases sólidas” [13].

O ponto eutético está assinalado na Figura 49 por um círculo a vermelho, onde este é constituído por cerca de 12 % de Si. A distinção entre uma composição hipoeutética ou hipereutética, é feita através da percentagem de silício que a liga possui. Isto é, todas as ligas com percentagem de silício inferior a 12% (esquerda do ponto eutético), são consideradas ligas hipoeutéticas. As ligas superiores a 12% de silício (direita do ponto eutético), são consideradas ligas hipereutéticas.

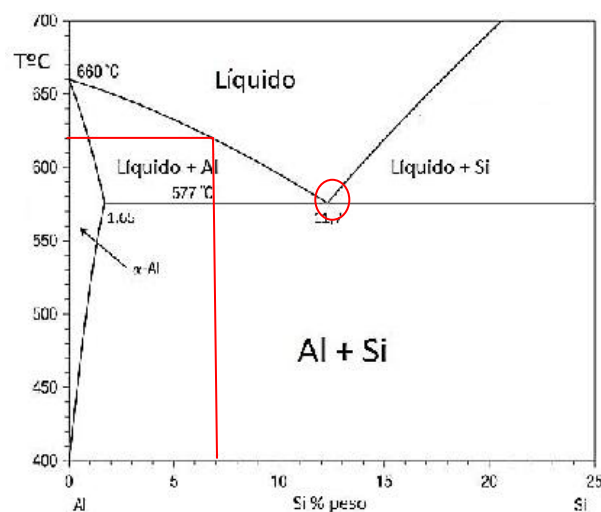


Figura 49 – Diagrama de fases Alumínio – silício [14]

A composição da liga é um aspeto muito importante, pois influencia a fluidez do metal durante o vazamento. O gráfico da Figura 50, representa a influência que o silício provoca na liga utilizada durante o estudo realizado.

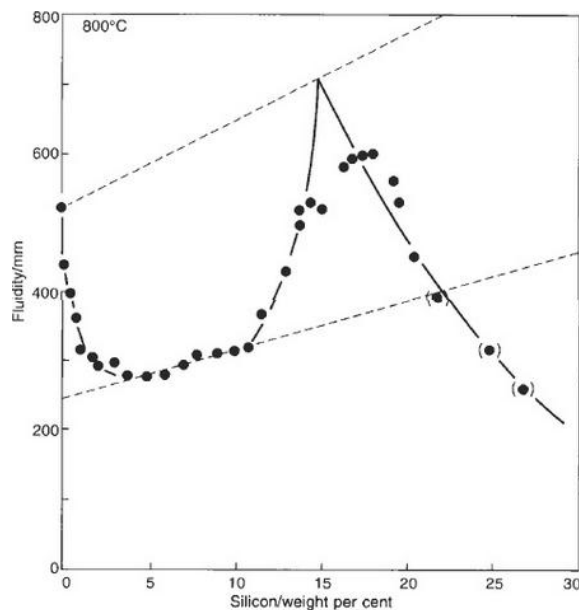


Figura 50 – Influência da percentagem de silício [15]

Através da análise do gráfico da Figura 50, verificamos que a liga tem maior fluidez no domínio hipereutético, cerca de 14,5% de silício, e a menor fluidez ocorre para 5 a 6 % de silício, no domínio hipoeutético. A partir dos 6% de silício, a fluidez tende a aumentar com o aumento da percentagem de silício, sendo que este torna a prejudicar a fluidez a partir dos 14,5% de silício. Mas por outro lado, *a fluidez é geralmente inversamente proporcional ao intervalo de solidificação* [15], isto é, quanto maior a fluidez menor o intervalo de solidificação.

Um outro aspeto que influencia a fluidez é o tipo de solidificação que ocorre. A solidificação dos metais puros e ligas eutéticas, ocorre apenas a uma temperatura como demonstra a Figura 51.

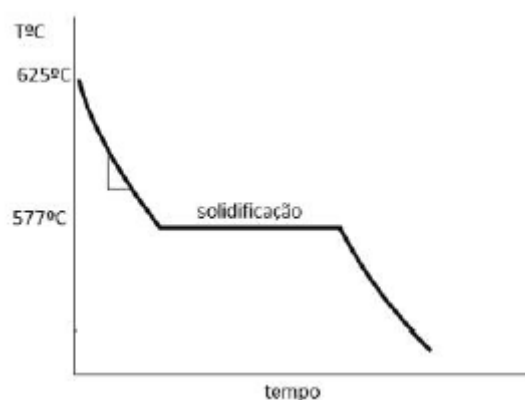


Figura 51 – Linha de arrefecimento para ligas eutéticas [16]

O metal quando entra em contacto com as paredes da moldação perde a temperatura de sobreaquecimento inicial, por sobrearrefecimento e começa o processo de solidificação nas paredes da moldação criando uma frente de solidificação. O canal para o metal líquido fluir torna-se mais fino, até

chegar ao ponto de estrangular a passagem na totalidade como mostra a Figura 52, terminando o fluxo de fluido [17].



Figura 52 – Fluxo do metal líquido para metais puros e ligas eutéticas [17]

Para as ligas não eutéticas, a temperatura de fusão não é única, isto é, o material não passa do estado líquido para o estado sólido numa única temperatura, como ocorre nas ligas eutéticas e metais puros, mas sim começa a ficar num estado pastoso até chegar a solidificação. Neste fenómeno de solidificação, ocorre o crescimento de dendrites, Figura 53, nas paredes do molde num estágio inicial, devido á perda do sobreaquecimento por sobrearrefecimento. Como o fluxo do metal é constituído por cristais, e com a existência de dendrites, a resistência ao fluxo do metal líquido é muito grande numa fase precoce da solidificação. Este tipo de solidificação é o que ocorre em maior parte das ligas de alumínio.



Figura 53 – Dendrite formada nas paredes da moldação, solidificação em camada espessa [17]

Num determinado ponto os braços das dendrites interligam-se entre si e o fluxo do metal líquido pára de fluir, como mostra a Figura 54. [17]

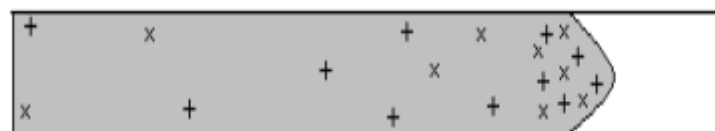


Figura 54 – Esquema da ponta de interrupção de metal, solidificação em camada fina [17]

O tipo de que ocorre durante o estudo efetuado é demonstrado na Figura 53, pois a liga utilizada é hipoeutética como dito anteriormente, pois apresenta 7% de silício. Para reduzir este tipo de formação de dendrites, é imposta à moldação uma temperatura de 350° C, de forma a minimizar o gradiente de temperatura entre as paredes da moldação e o metal líquido.

### 4.5.3. PONTO DE FUSÃO

Depois de selecionado o tipo de material, resta saber qual o ponto de fusão deste. Através da Figura 49, onde está representado o diagrama de fases do Alumínio- Silício, podemos verificar que o ponto de fusão desta liga de alumínio é por volta do 620°C, como está sublinhado a vermelho no diagrama.

Após o material atingir esta temperatura, este passa do estado sólido para o estado totalmente líquido. Torna-se necessário elevar a temperatura de forma que o material obtenha fluidez suficiente para preencher todas as cavidades. Pois a 620 °C, garantimos que este está líquido mas não fluido o suficiente. Sendo assim, a temperatura de fusão utilizada para esta liga foi de 660°C (sobreaquecimento), de forma a garantir que o material estava suficientemente fluido. Um outro aspeto a ter em conta em relação à temperatura de fusão, foi a necessidade de manter e executar a fusão do material sempre com a mesma temperatura, de forma a não influenciar os resultados. Isto é, o mesmo material fundido a temperaturas diferentes, vai apresentar uma fluidez diferente, como o intuito é verificar a influência da vibração na fluidez, não fazia sentido alterar a temperatura de fusão, pois os resultados não podiam ser diretamente comparados.

### 4.6. Condições de vazamento

Como já dito anteriormente o vazamento é feito na máquina *INDUTHERM*. Este vazamento é portanto controlado parcialmente, isto é, algumas das condições preponderantes no processo de fundição são controlados, através do painel de controlo existente na *INDUTHERM*, como podemos ver na Figura 55. As condições controladas são então:

- Pressão de gás inerte (Árgon) injetado
- Temperatura do material
- Frequência de vibração
- Amplitude
- Rugosidade das amostras
- Temperatura da moldação



Figura 55 – Painel da INDUTHERM

O árgon é um gás inerte, que permite criar uma atmosfera protetora entre o metal líquido e o oxigênio, evitando assim a oxidação e uma redução das emissões de fumos. Este durante o processo é injetado com uma pressão de 1.5 bar.

A temperatura de fusão altera de material para material, dependendo da sua constituição. A *INDUTHERM* permite controlar, e programar a temperatura de fusão a que este funde com grande facilidade. Para garantir que esta temperatura é constante e não ultrapasse em demasia a temperatura desejável, e provocar reações indesejáveis no metal, este possui um sistema de refrigeração a água que envolve toda a camara de fusão. A água encontra-se em constante circulação, por um chiller, de forma a arrefecer e garantir a refrigeração.

A frequência de vibração é um dos aspetos que é controlado mas é variável ao longo dos diferentes estudos. As variações são descritas para cada caso de estudo executado. Os diferentes níveis de vibração conseguidos são descritos no capítulo 3.10.

Um dos aspetos muito importantes neste estudo, é o início e fim da vibração assim como, onde é aplicada. Em todos os ensaios realizados a vibração foi aplicada na parte inferior da moldação e iniciou-se segundos antes do vazamento, de maneira a garantir uma vibração constante, e não progressiva, isto é, o vazamento apenas era efetuado quando o motor estivesse a trabalhar de forma constante. O fim da vibração dava-se 5 segundos após o vazamento do material, isto é, o motor era desligado 5 segundos após o vazamento.

A amplitude de vibração é outro dos aspetos controlados, mas este é constante para todos os estudos, devido aos motivos descritos no capítulo 3.10.

A temperatura da moldação foi idealizada nos 350°C, pois é a mínima temperatura que garante a não fissuração do gesso.

Todos os outros aspetos importantes no processo de fundição, são efetuados em condições normais, isto é, fundição por gravidade.

Antes de passar para o capítulo 5, onde é feita a análise dos resultados é necessário descrever todas as condições tais como, temperaturas de vazamento, temperaturas da moldação, frequência, e rugosidade presente nas amostras em cada caso de estudo. Na Tabela 7, estão representadas as condições dos ensaios.

Tabela 7 - Condições de ensaio

	TM = 350°C, TV= 660°C		
Espessura	Rugosidade ( $\mu\text{m}$ )	Tipo de amostra	Frequência (Hz)
0.3 mm	0	A	0, 2, 10, 16, 20, 25
	2.6	B	
	3	C	
0.6 mm	0	D	0, 2, 10, 16, 20, 25
	2.6	E	
	3	F	

#### 4.7.Desmoldação

Após todas as etapas descritas anteriormente, passamos para a fase de desmoldação, isto é, retirar a peça vazada que se encontra envolvida por gesso. De salientar que esta etapa só pode ocorrer depois de o material vazado estar completamente solidificado.

Como foi descrito no capítulo 4.3.2, o elemento ligante do gesso é a água. Esta após sofrer o tratamento térmico descrito anteriormente evapora, ficando a moldação completamente isenta de água. Como a moldação se encontra isenta de água e a uma temperatura inferior a TM (temperatura da moldação), um mergulho dentro de um recipiente de água à temperatura ambiente Figura 56, irá provocar um choque térmico na moldação, e por conseguinte o gesso desintegra-se na sua totalidade. A água que anteriormente foi o elemento ligante, funciona também como elemento desmoldante.

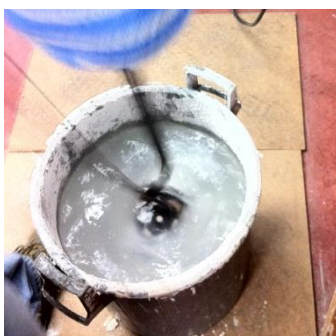


Figura 56 – Desmoldação



Após efetuado o mergulho de alguns segundos (até se encontrar á temperatura ambiente), dentro do recipiente de água, os dois materiais encontram-se completamente separados, obtendo o componente representado na Figura 57.



Figura 57 – Componente obtido após vazamento e desmoldação

A análise de resultados que se segue, foi feita através de componentes idênticos ao representado na Figura 57, mas em condições de vazamento diferentes. Estas condições são descritas para cada caso de estudo. Esta etapa de desmoldação é efetuada para todos os estudos realizados.



## **PARTE IV - RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO**

## 5. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

Após descritos todos os procedimentos e características das amostras, tais como a rugosidade e espessura, tipo de amostra, é necessário fazer uma análise detalhada dos resultados obtidos, de forma a validar o objetivo deste trabalho.

Como dito em capítulos anteriores, o objetivo deste trabalho é verificar a influência que a vibração provoca na fluidez do metal. Neste estudo a fluidez é quantificada através do seu comprimento, isto é, a cavidade moldante tem 70 mm de comprimento, logo a fluidez máxima que é possível obter é de 70 mm. Ou seja, a fluidez é quantificada através da capacidade que o material possui para preencher as cavidades moldantes, em que neste caso a fluidez é medida pelo seu comprimento.

Para seguir com o fundamento deste estudo, é esperado que a fluidez máxima apenas seja obtida em casos extremos, isto é, vibração máxima. Pois caso contrário não será possível estudar a influência da vibração na fundição, visto que não iria provocar qualquer efeito na fluidez.

A teoria deste é demonstrar que a fluidez pode seguir uma tendência a par da vibração, ou seja, a fluidez aumenta conforme aumenta a vibração.

Para efetuar esta análise foram feitos três casos de estudo, para cada espessura, onde a rugosidade é variável entre os três casos, mas constante para cada caso. O fenômeno que varia ao longo de cada caso de estudo, é a frequência de vibração, isto é, para cada tipo de amostra ocorrem seis níveis de vibração diferentes como demonstra a Tabela 7.

Os resultados foram tratados e trabalhados no *Software Excel*, onde posteriormente foram elaborados gráficos com as medições obtidas através dos ensaios executados.

Para cada caso é executado um gráfico, onde é possível verificar a progressão da fluidez.

Por fim, de forma a excluir alguns resultados, menos favoráveis, e a verificar a tendência, são introduzidas linhas de tendência nos gráficos, de forma a verificar o seu percurso ideal.

### 5.1. Análise de resultados das amostras do tipo A,B e C

Na Figura 58, estão representados todas as árvores fundidas ao longo dos ensaios para as amostras de 0,3 mm. Como descrito em capítulos anteriores, cada árvore possui três colunas de amostras, sendo que cada coluna tem duas amostras. Na Tabela 7, as amostras são classificadas por A,B,C,D,E e F, em que o tipo de amostra A corresponde a uma espessura de 0,3 mm e uma rugosidade de 0  $\mu\text{m}$ , e assim sucessivamente para todas as outras amostras. Estas amostras apresentam rugosidades diferentes em cada coluna, ou seja, uma coluna tem amostras do tipo A, uma segunda tem do tipo B, e uma terceira coluna apresenta amostras do tipo C, acontecendo o mesmo para as amostras do tipo D, E e F.

Mais uma vez, na Figura 58 estão representadas seis imagens. Estas são referentes aos ensaios do tipo A,B e C, e aos diferentes níveis de vibração aplicados, sendo que a imagem da esquerda apresenta a vibração nula (0 Hz), e a imagem da direita corresponde ao maior nível de vibração (25 Hz). O restante das imagens corresponde a ordem de vibração descrita na Figura 58.



Figura 58- Árvores criadas para a análise de 0,3 mm, para as amostras do tipo A,B e C

No subcapítulo seguinte estão representados os gráficos dos diferentes tipos de amostras, em conjunto com os seis níveis de vibração. Para a construção dos gráficos foi retirado o comprimento das amostras (fluidez), de todos os níveis de vibração correspondentes ao mesmo tipo.

## 5.1.1. ANÁLISE DE RESULTADOS DAS AMOSTRAS DO TIPO A

A primeira análise corresponde às amostras do tipo A, em que no gráfico o eixo das abcissas corresponde à frequência de vibração, e o eixo das coordenadas corresponde à fluidez do metal.

Numa primeira abordagem podemos verificar que em nenhum dos níveis de vibração o comprimento máximo das amostras é atingido. Isto torna-se muito benéfico para a continuação do estudo, pois só assim podemos fazer uma análise de resultados em relação ao efeito da vibração.

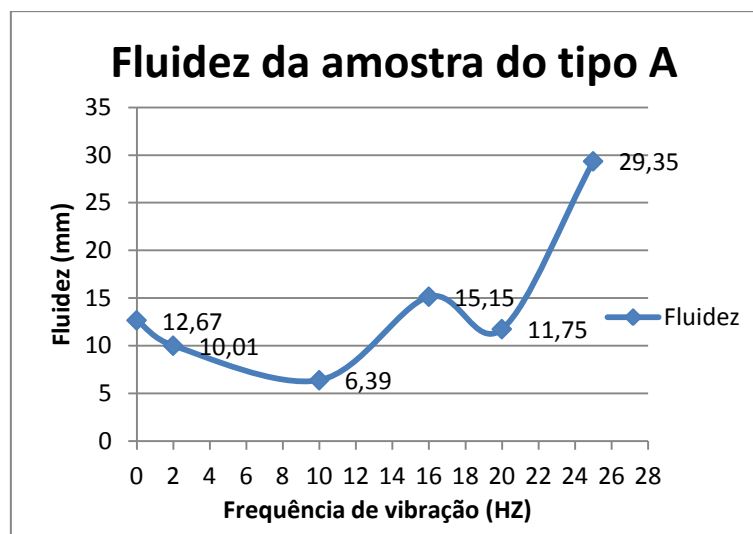


Figura 59- Gráfico da relação fluidez/vibração para as amostras do tipo A

De acordo com a Figura 59, a fluidez para a vibração de 0Hz, é relativamente reduzida, sendo que esta tem 12,67 mm. Continuando com a análise podemos verificar que com a imposição da frequência de vibração, a fluidez tende a diminuir. Mas esta tendência apenas se verifica até à vibração de 10 Hz. A partir desta podemos verificar um aumento significativo da fluidez do metal, de tal forma que a fluidez para a frequência de 16 Hz, já é maior do que para a frequência de 0 Hz. Entre a frequência de 16 e 20 Hz, ocorre um decréscimo da fluidez. Este decréscimo pode ser explicado, pelo facto da possibilidade de existir porosidades dentro da cavidade moldante, por um pico de energia, o que poderia provocar um decréscimo da vibração do motor, à elevada dispersão de resultados ou então pelos fenómenos de transferência de calor que neste momento ainda não são identificáveis, ou são pouco claros.

Com a frequência de vibração superior a 20 Hz, isto é, com uma frequência de vibração de 25 Hz, verifica-se que a fluidez aumenta muito significativamente, de tal forma que esta chega

aproximadamente aos 30 mm. Com a análise deste, podemos dizer que a fluidez do metal aumentou cerca de 2 vezes, do que a fluidez inicial.

Este aumento verifica-se de uma forma mais acentuada na Figura 60. Nesta está representada o mesmo gráfico da Figura 59, mas agora com a adição da linha de tendência. Esta linha descreve de uma forma mais ampla a fluidez do metal, isto é, calcula o maior número de pontos através dos pontos já existentes.

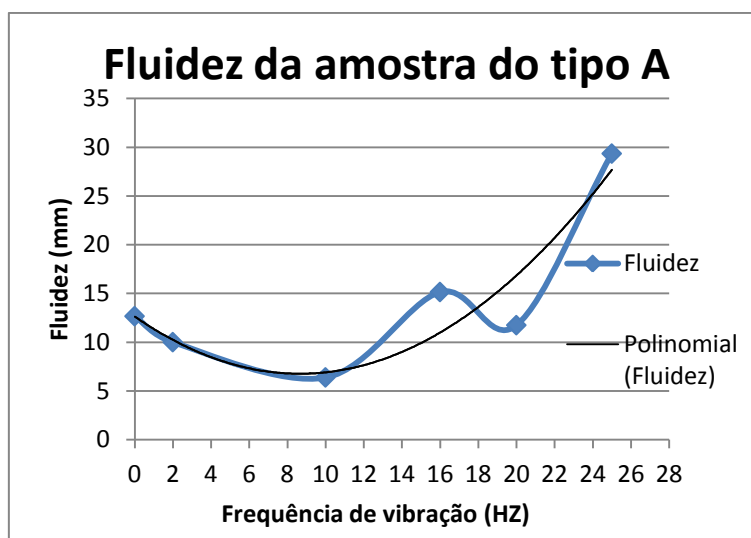


Figura 60- Gráfico da relação fluidez/vibração para as amostras do tipo A, em comparação com a linha de tendência

Pela análise mais detalhada do gráfico da Figura 60, podemos ver que o decréscimo da fluidez do metal na linha de tendência comporta-se de igual forma na linha de fluidez. Mas este decréscimo com a adição da linha de tendência apenas ocorre até aos 8 Hz, enquanto que na linha de fluidez este decréscimo era prolongado até aos 10 Hz.

A partir dos 8 Hz a linha de tendência tem um comportamento que podemos dizer que é o ideal isto é, conforme aumenta a frequência de vibração, o aumento da fluidez é progressivo.

Nas frequências de vibração a partir dos 16 Hz, verifica-se um aumento de fluidez abrupto, de tal forma que esta passa de 11,75 mm de fluidez para aproximadamente 29,35 mm de fluidez, numa gama de vibração que está entre os 16Hz e os 25 Hz. Logo podemos afirmar que a vibração influencia positivamente a fluidez.

#### 5.1.2. ANÁLISE DE RESULTADOS DAS AMOSTRAS DO TIPO B

Numa primeira análise tal como nas amostras do tipo A, em nenhum dos níveis de vibração a fluidez máxima é atingida, como mostra a Figura 61. Numa primeira observação podemos verificar que novamente a vibração influencia a fluidez de um modo bastante positivo.

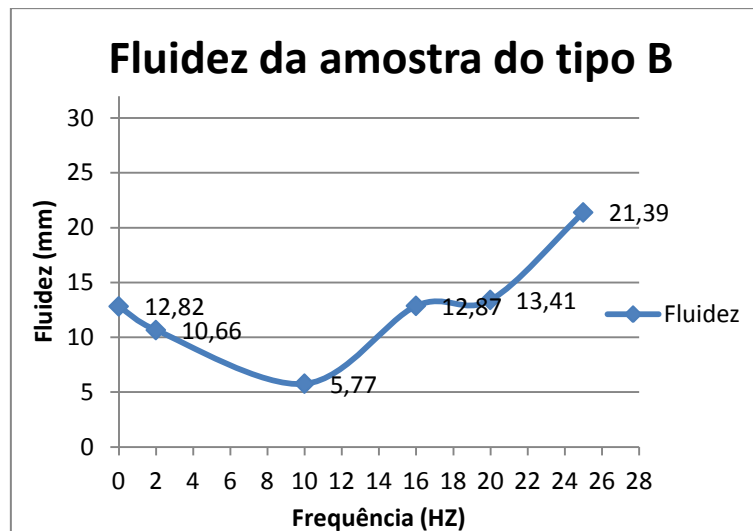


Figura 61- Gráfico da relação fluidez/vibração para as amostras do tipo B

Fazendo uma análise mais profunda do gráfico da Figura 61, vemos que para uma frequência de vibração de 0 Hz, nula, a fluidez tem 12,82 mm. Com a aplicação da vibração, a fluidez mais uma vez sofre um decréscimo acentuado, sendo que este decréscimo ocorre entre as frequências de vibração de 0 a 10 Hz. Após ultrapassada a frequência de 10 Hz, denota-se um aumento relevante da fluidez do metal. Este aumento verifica-se para uma frequência de 16 Hz, obtendo uma fluidez de 12,87 mm, o que já é superior à frequência de 0 Hz.

No intervalo de 16 a 20 Hz, a fluidez aumenta insignificativamente, sendo que esta para 16 Hz é de 12,87 mm, e para 20 Hz a fluidez é de 13,41 mm. Para a frequência de 25 Hz a fluidez aumenta de uma forma muito significativa como verificado para a amostra do tipo A. Este aumento é novamente cerca do dobro da fluidez, isto é, frequência de 0 Hz tem uma fluidez de 12,82 mm e 25 Hz tem uma fluidez de 21,39 mm.

Adicionando uma linha de tendência como mostra a Figura 62, podemos ver que o decréscimo da fluidez do metal, é mais acentuado na linha de fluidez. Esta é mais acentuada e abrange mais gamas de vibração, isto é, com a linha de fluidez, o decréscimo é maior, e perlonga-se até os 10 Hz, enquanto que, para a linha de tendência o decréscimo é menor, e mesmo tempo mais curto, o que faz com que apenas abranja frequências de vibração (até os 8 Hz).



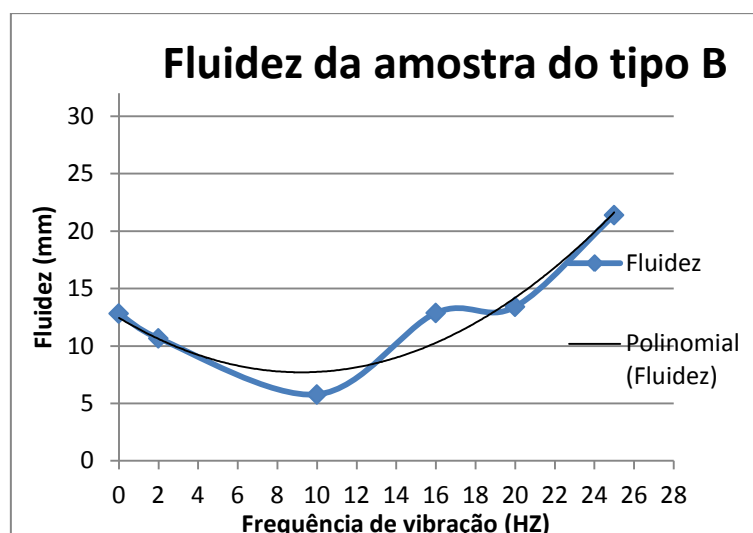


Figura 62- Gráfico da relação fluidez/vibração para as amostras do tipo B, em comparação com a linha de tendência

A partir dos 8 Hz, verifica-se um aumento progressivo da fluidez na linha de tendência, sendo que a linha de fluidez também apresenta o mesmo resultado. Tal como a amostra do tipo A, a linha de tendência torna a sobressair muito positivamente a partir dos 16 Hz, até aos 25 Hz, em que surge um aumento significativo da fluidez do metal. Mais uma vez podemos dizer que a vibração influencia positivamente a fluidez do metal de tal forma que, para a vibração nula (0 Hz) a fluidez é de 12,82 mm, e para a vibração de 25 Hz a fluidez é de 21,39 mm.

### 5.1.3. ANÁLISE DE RESULTADOS DAS AMOSTRAS DO TIPO C

Seguindo a mesma análise efetuada para os outros tipos de amostras, na Figura 63 temos o gráfico que resume o estudo para as amostras do tipo C. Como podemos ver, mais uma vez nenhum dos níveis de vibração foi capaz de atingir a fluidez máxima.

Fazendo uma análise do gráfico, podemos verificar que a vibração desde os 0 até aos 10 Hz tem um efeito prejudicial tal como nos outros tipos de amostras. Para frequências superiores a 10 Hz, verificamos que a vibração foi sempre benéfica até à vibração máxima, isto é, a fluidez do metal foi aumentando progressivamente conforme aumentava a vibração. A fluidez máxima conseguida foi mais uma vez com 25 Hz de frequência de vibração.

Um dos aspetos a salientar neste gráfico, é a fluidez conseguida para a vibração máxima. Nas amostras do tipo A e B, para a frequência de vibração máxima, a fluidez aumentava para cerca do dobro, o que não acontece nesta amostra, sendo que esta apenas tem melhorias de cerca de 1,5 vezes de fluidez.

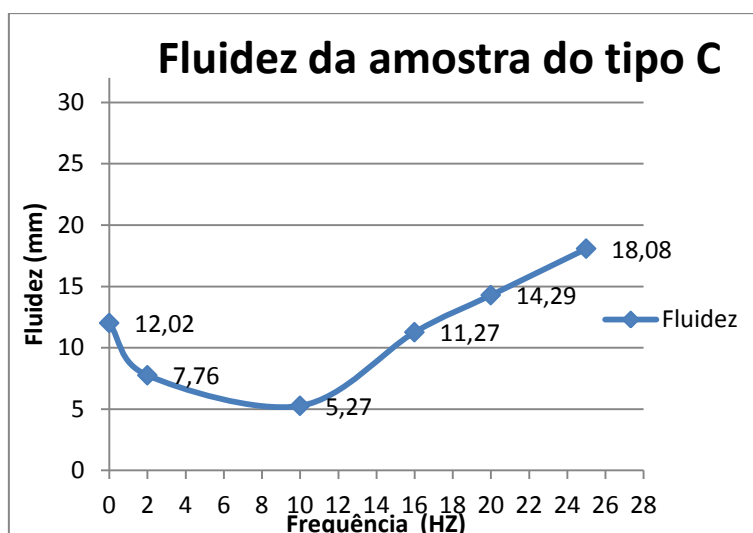


Figura 63- Gráfico da relação fluidez/vibração para as amostras do tipo C

Aplicando a linha de tendência (Figura 64), verificamos que o decréscimo da fluidez é menor na linha de tendência. Tal como nas amostras anteriores, o decréscimo da fluidez não é tão acentuado e ao mesmo tempo é mais curto. Este decréscimo é novamente até aos 8 Hz de frequência de vibração como acontece nas amostras anteriores. A partir dos 8 Hz de nota-se um aumento da fluidez do metal, mas de forma menos agressiva, do que aquele que foi verificado nas amostras anteriores.

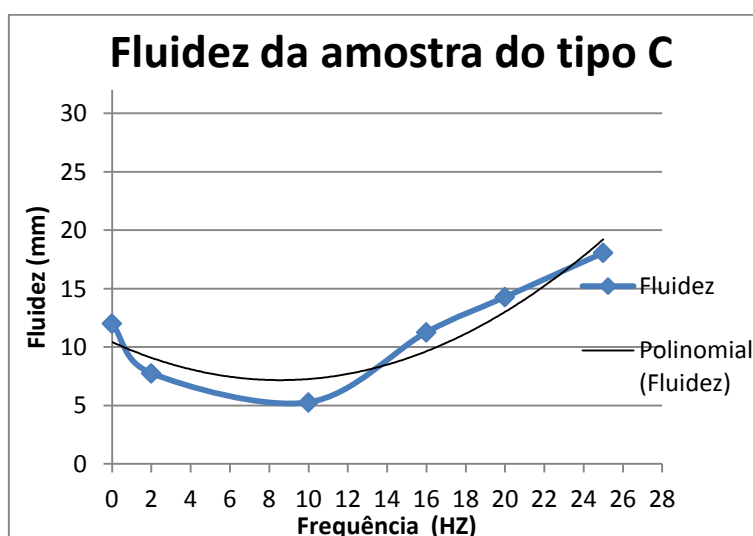


Figura 64- Gráfico da relação fluidez/vibração para as amostras do tipo C, em comparação com a linha de tendência

### 5.1.4. RESUMO DAS ANÁLISES DAS AMOSTRAS DO TIPO A, TIPO B, E TIPO C

Após a análise dos gráficos das amostras do tipo A,B e C, podemos concluir que, nos três tipos de amostras a vibração entre os 0 e 10 Hz é prejudicial, ou seja, reduz a fluidez do metal.

A partir dos 10 Hz de frequência de vibração a fluidez volta a aumentar até aos 16 Hz, de tal forma que nas amostras do tipo A e B para esta frequência a fluidez já é maior do que a inicial. Na amostra do tipo C aos 16 Hz a fluidez ainda não é superior á fluidez inicial, mas esta aumenta progressivamente com o aumento da vibração.

Nas amostras do tipo A e B, existe um intervalo de frequência de vibração que está compreendido entre os 16 e os 20 Hz, em que existe uma grande dispersão de resultados para poucos resultados. Aplicando a linha de tendência verifica-se que esses pontos são desajustados à linha. Sendo assim, neste intervalo nada se pode concluir, pois não existem dados suficientes para concluir o que acontece neste intervalo.

Outro aspeto a ter em consideração é a fluidez máxima obtida nas diferentes amostras. A fluidez máxima conseguida foi de forma decrescente da amostra do tipo A para a amostra do tipo C. Sabendo que estas têm rugosidades diferentes, pode-se dizer então que a rugosidade está a prejudicar a fluidez do material

Podemos assim concluir, que a vibração nas amostras do tipo A, B e C, provoca efeitos benéficos na fluidez do metal, como comprovado através dos gráficos para as diferentes frequências de vibração. Com a aplicação da linha de tendência conseguimos obter o modelo teórico ideal [1] para a influência da vibração na fluidez do metal. Podemos também dizer que a rugosidade tem influência negativa em conjunto com a frequência de vibração. Esta informação é verificada durante o estudo, mas não é possível alongar esta análise, pois este estudo não foi proporcionado para tal.

### 5.2. Análise de resultados das amostras do tipo D,E e F

Tal como descrito no capítulo 5.1, para as amostras do tipo A, B e C, na Figura 65 estão representadas todas as árvores criadas para os ensaios das amostras de 0,6 mm, referentes às amostras do tipo D, E e F. Mais uma vez as árvores representadas na Figura 65 correspondem aos ensaios mencionados anteriormente, com os diferentes níveis de vibração descritos na Tabela 7. A imagem da esquerda é referente à vibração nula (0 HZ), passando para a segunda imagem que corresponde a uma vibração de 2 Hz, e assim sucessivamente, seguindo a ordem de vibração representada na Figura 65.

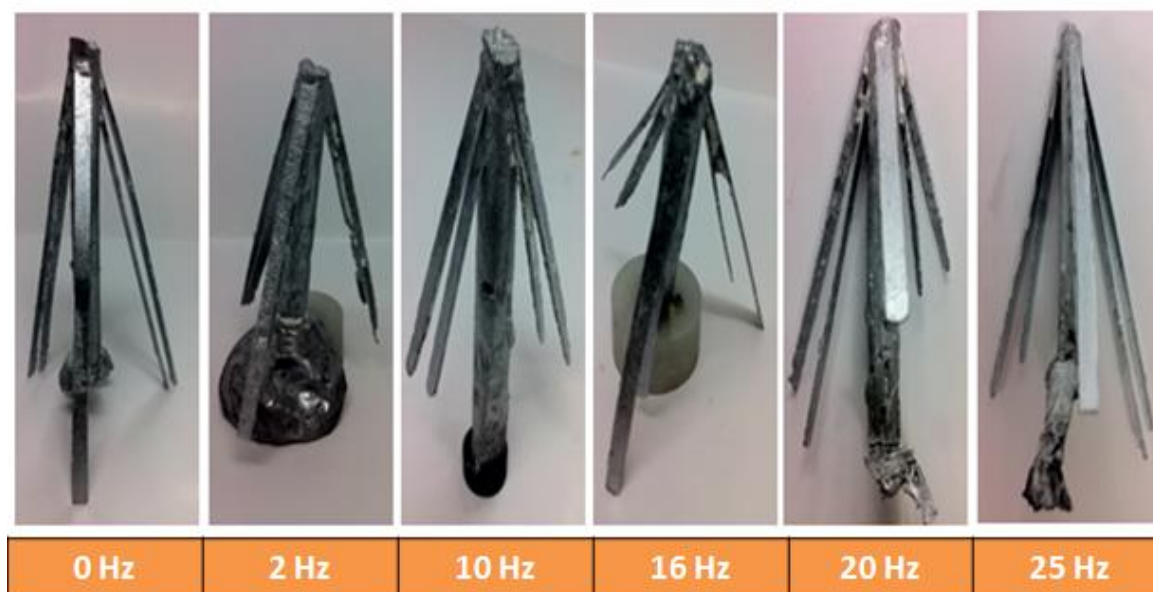


Figura 65 - Árvores criadas para a análise de 0,6 mm, para as amostras do tipo D,E e F.

No subcapítulo seguinte estão representados os diferentes gráficos dos diferentes tipos de amostras.

### 5.2.1. ANÁLISE DE RESULTADOS DA AMOSTRAS DO TIPO D

Fazendo a análise das novas amostras, podemos verificar até pela Figura 65, que em grande parte das amostras a fluidez máxima foi atingida. Este facto não é benéfico para o estudo pois não permite dizer se a vibração está a melhorar a fluidez. Na Figura 66, está representado o gráfico da amostra do tipo D. Numa primeira abordagem, podemos ver que a fluidez máxima é atingida em três níveis de vibração diferentes, esses níveis são 0, 16 e 25 Hz.

Fazendo uma análise mais detalhada, podemos ver que para uma vibração nula (0 Hz), a fluidez é máxima. A partir deste, a fluidez tem um decréscimo bastante acentuado, ou seja, tem um efeito prejudicial, de tal forma que este percorre dois níveis de vibração, sendo eles 2 e 10 Hz, e a redução da fluidez é de 70 mm para 36,02 mm. Ultrapassados os 10 Hz de frequência verificamos um aumento abrupto da fluidez para uma frequência de vibração de 16 Hz. Este aumento foi de tal forma abrupto, que a fluidez máxima (70 mm) foi novamente atingida.

Após os 16 Hz, ocorre novamente um decréscimo bastante acentuado da fluidez do metal, até à frequência de 20 Hz, mas nada se pode concluir acerca deste, devido há dispersão de resultados. Este decréscimo é da mesma ordem de grandeza do que acontece para a frequência de 10 Hz. Depois

dos 10 Hz de frequência de vibração, temos novamente um aumento abrupto da fluidez, ou seja para a frequência de 25 Hz a fluidez máxima é novamente atingida.

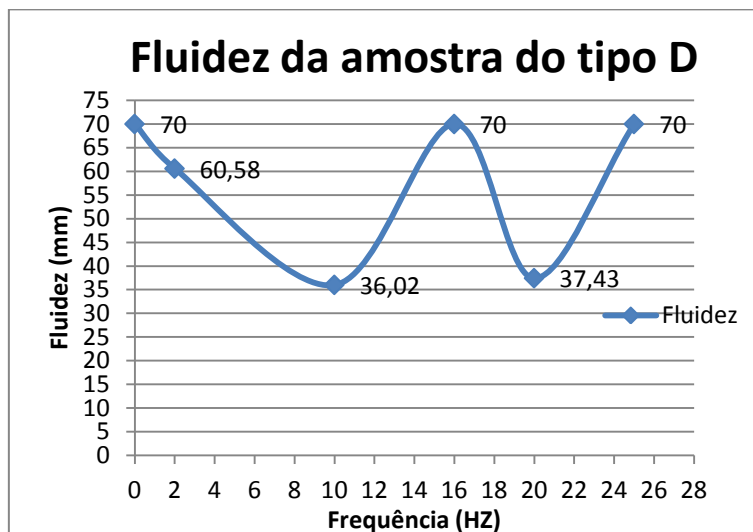


Figura 66 - Gráfico da relação fluidez/vibração para as amostras do tipo D

Utilizando e aplicando a linha de tendência, como feito nas análises anteriores, podemos verificar na Figura 67 que existem algumas variações da linha de tendência em relação à linha de fluidez.

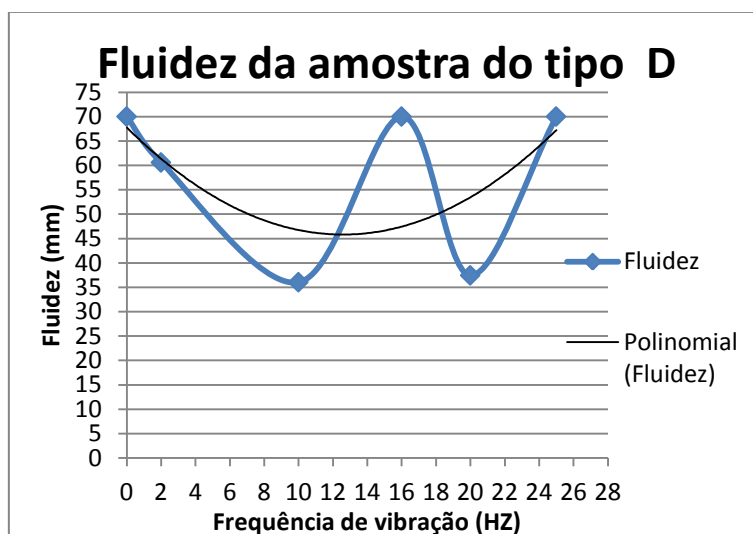


Figura 67 - Gráfico da relação fluidez/vibração para as amostras do tipo D, em comparação com a linha de tendência

Analisando a linha de tendência, podemos ver que esta, no intervalo dos 0 aos 10 Hz de frequência, apresenta um decréscimo menos acentuado e maior do que a linha de fluidez. Este decréscimo traçado pela linha de tendência, é mais desfavorável, pois a gama de frequência que é prejudicial para a fluidez do material aumenta para cerca dos 12 Hz. A partir deste, a linha de

tendência mostra que a frequência vibração é favorável para a fluidez do metal, de tal forma que a fluidez é proporcional ao aumento da frequência de vibração, atingindo a fluidez máxima para os 25 Hz.

### 5.2.2. ANÁLISE DE RESULTADOS DAS AMOSTRAS DO TIPO E

Pela observação do gráfico da Figura 68, podemos ver que mais uma vez a vibração provoca influência na fluidez do metal.

Analisando o gráfico, vemos que para a vibração nula (0 Hz) a fluidez máxima é atingida. Pela primeira vez esta fluidez não sofre um decréscimo no segundo nível de vibração (2 Hz), mas mantém-se constante. Após este ocorre um decréscimo da fluidez do metal tal como nas amostras anteriores. O decréscimo ocorre desde os 2 Hz de vibração tendo uma fluidez de 70 mm, para os 10 Hz, ficando este com uma fluidez de 41,49 mm de fluidez. Ultrapassados os 10 Hz, a vibração volta a influenciar positivamente a fluidez do metal, visto que ocorre um aumento da fluidez para a frequência de 16 Hz. Seguindo a análise do gráfico vemos que dos 16 Hz para os 20 Hz, ocorre um decréscimo da fluidez, embora que mais pequeno do que na amostra do tipo D. Seguindo-se com um aumento abrupto da fluidez do metal, de tal forma que aos 25 Hz a fluidez máxima é atingida.

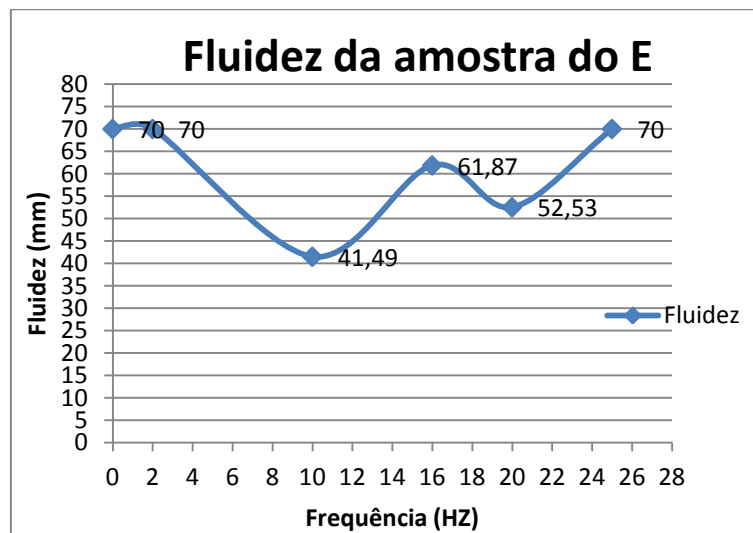


Figura 68 - Gráfico da relação fluidez/vibração para as amostras do tipo E

Analisando a Figura 69, onde está representado o gráfico da amostra do tipo E, agora em conjunto com a linha de tendência, vemos que mais uma vez esta apresenta variações em relação à linha de fluidez, também devido há dispersão de resultados.

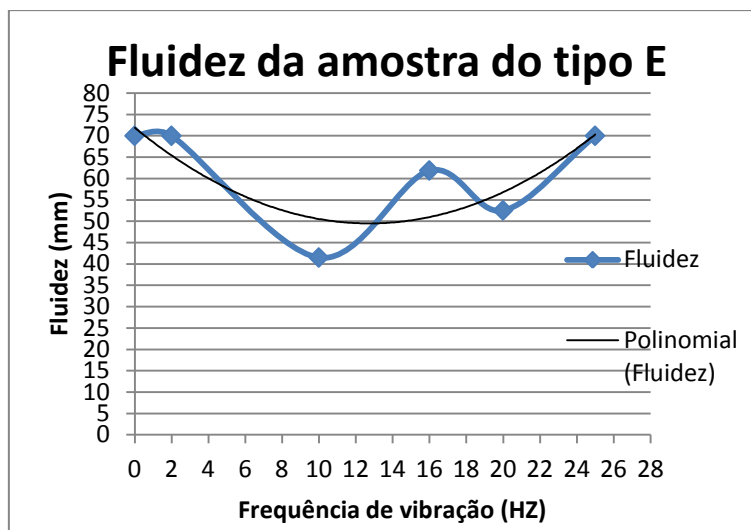


Figura 69 - Gráfico da relação fluidez/vibração para as amostras do tipo E, em comparação com a linha de tendência

Como nas análises anteriores esta segue a mesma tendência, isto é, até aos 10 Hz de frequência de vibração, assistimos a um decréscimo da fluidez do metal, embora que, a gama de frequência prejudicial para a fluidez é aumentada para os 10 Hz. Logo a frequência de vibração que provoca benefícios novamente na fluidez começa numa frequência de 12 Hz.

A partir dos 12 Hz de frequência de vibração a fluidez do metal tem um aumento pouco significativo até aos 16 Hz. Nas frequências posteriores a este, a fluidez do metal sofre aumentos significativos de tal forma que para a frequência de 25 Hz a fluidez máxima é atingida novamente.

### 5.2.3. ANÁLISE DE RESULTADOS DAS AMOSTRAS DO TIPO F

Na Figura 70, está representado o gráfico da amostra do tipo F, onde numa simples abordagem vemos que mais uma vez a vibração provoca influência na fluidez do metal.

Fazendo uma análise mais detalhada podemos ver que com a vibração nula (0 Hz), a fluidez é máxima. Tal como aconteceu na amostra do tipo E a fluidez manteve-se constante até aos 2 Hz de frequência de vibração. Após esta a fluidez sofre um elevado decréscimo, de tal ordem que a fluidez passa dos 70 mm para os 33,12 mm. Este decréscimo verifica-se até à frequência de 10 Hz. Depois desta a fluidez do metal sofre um aumento constante até à frequência de vibração máxima e por conseguinte, até à fluidez máxima. Podemos afirmar neste caso, que a fluidez do metal é diretamente proporcional à frequência de vibração, isto é, conforme a vibração aumenta a fluidez também aumenta.

Um dos aspetos a salientar na análise deste gráfico, é a forma que a curva deste apresenta, isto é, esta curva é a curva apresentada para o modelo teórico ideal da influência da vibração [1] na fluidez do metal.

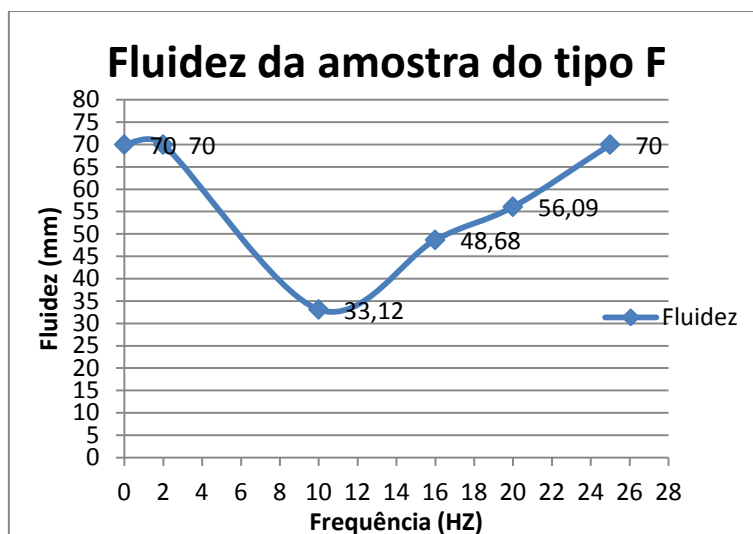


Figura 70 - Gráfico da relação fluidez/vibração para as amostras do tipo F

Com a adição da linha de tendência como vemos na Figura 71, as alterações que se notam são muito reduzidas.

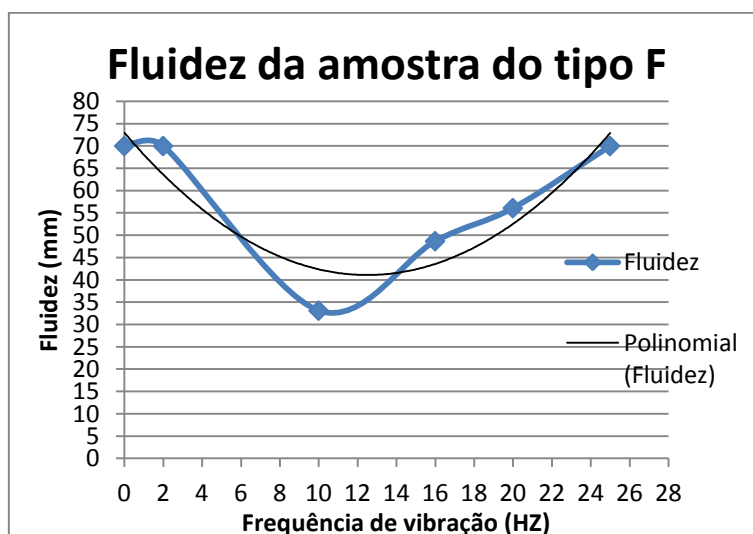


Figura 71 - Gráfico da relação fluidez/vibração para as amostras do tipo F, em comparação com a linha de tendência

A alteração que mais sobressai, é a partir dos 6 Hz de frequência de vibração, visto que o decréscimo da fluidez é mais reduzido, mas este prolonga-se até aos 10 Hz. A partir dos 16 Hz ocorre um aumento abrupto da fluidez do metal, de modo que nas frequências de vibração posteriores



verifica-se um aumento da fluidez proporcional com o aumento da vibração. Para a frequência de vibração máxima a fluidez máxima é mais uma vez atingida.

### 5.2.4.RESUMO DAS ANÁLISES DAS AMOSTRAS DO TIPO D, TIPO E, E TIPO F

Depois de efetuada a análise das amostras do tipo D, E e F, nada podemos concluir devido há fluidez máxima obtida nas amostras em que a frequência é de 0 Hz. Mas por outro lado podemos dizer que nos três tipos de amostras a vibração máxima não tem efeitos prejudiciais em relação à fluidez do metal.

Aprofundando mais a análise, dos três tipos de amostras, conclui-se que para frequências entre os 0 e os 10 Hz, a frequência de vibração apenas mostra ser prejudicial para a fluidez.

A partir dos 10 Hz de frequência, nota-se um aumento bastante significativo da fluidez do metal até aos 16 Hz, tanto que para a amostra do tipo D a esta frequência já atingiu a fluidez máxima. No restante das amostras este aumento da fluidez também se fez notar, no entanto não chegaram à fluidez máxima, como no ponto inicial.

Depois desta frequência de vibração a fluidez parece ser proporcional à vibração, pois com o aumento da vibração, ocorreu de igual forma um aumento da fluidez até a fluidez e vibração máxima.

Com a aplicação da linha de tendência podemos ver nos gráficos das Figura 67, Figura 69, Figura 71, que existem pontos que estão muito desajustados à linha. Logo neste intervalo, os resultados obtidos não nos permite concluir nada devido à dispersão dos resultados existente, assim como o número de resultados.

Um dos aspetos a ter em conta nos três tipos de amostras, é o número de vezes que a fluidez máxima é atingida. Na amostra do tipo D (0 $\mu$ m), a fluidez máxima é atingida em 3 níveis de frequência, enquanto que, nas amostras do tipo E (2,6 $\mu$ m) e F (3 $\mu$ m), esta apenas é atingida em 2 níveis de vibração. Mais uma vez tal como na análise das amostras do tipo A, B e C, as diferentes rugosidades das amostras podem estar a provocar efeitos prejudiciais na fluidez do metal. No entanto não é possível dizer qual a fluidez máxima possível de obter com estas amostras e com vibração máxima, pois as amostras mostraram ser de dimensão reduzida, e encheram na sua totalidade com vibração nula e máxima.

Por fim pela análise da amostra do tipo F, podemos dizer que possivelmente o comportamento da fluidez das amostras do tipo D, E e F, pode seguir o mesmo comportamento das amostras do tipo A, B e C, ou seja, a fluidez máxima pode ser obtida na vibração máxima, construindo o modelo teórico

da fluidez do metal [1], podendo com isto dizer que mais uma vez a vibração provoca efeitos benéficos na fluidez do metal.

### 5.3. Discussão

Com a análise dos seis tipos de amostras, podemos afirmar que todas seguem o mesmo modelo, isto é, até determinada frequência de vibração a fluidez é prejudicada, aumentando os níveis de vibração a fluidez tende a melhorar.

Esta análise vai ter ao encontro do estudo [1] apresentado no subcapítulo 2.5.3, onde é descrito a influência da vibração nos fenómenos de transferência de calor. Neste é apresentado um mecanismo (Figura 15) possível para explicar os fenómenos de transferência de calor em conjunto com a vibração.

Para o estudo realizado este mecanismo verifica-se de igual forma, pois a transferência de calor está diretamente relacionada com a fluidez, pois quanto maior a transferência de calor menor é a fluidez e vice-versa.

Para frequência de 0 Hz, no vazamento o contacto é normal entre o metal líquido e a moldação, logo a fluidez é normal.

Para frequência até 10 Hz, verifica-se um decréscimo acentuado da fluidez, isto porque, a vibração impõe uma maior transferência de calor para a moldação, devido ao movimento alternado do líquido. Para esta frequência de vibração a área de contacto é idêntica à área de contacto de 0 Hz. Mas, o aumento de transferência de calor para a moldação é devido à melhoria do fenómeno de convecção de calor, pelo movimento de vibração. Isto é, a temperatura do metal líquido aumenta na sua interface, o que provoca uma maior transferência de calor para a moldação. Para esta frequência de vibração, para além do fenómeno de condução presente, tal como esta para 0 Hz, ainda é melhorada a convecção.

Com frequência de vibração até os 25 Hz, verifica-se um aumento significativo da fluidez. Este aumento deve-se à aceleração relativa entre o metal líquido e a moldação. Esta aceleração parece ser suficientemente elevada para criar a perda de contacto entre o metal líquido e a moldação. Esta perda de contacto significa mudar a transferência de calor de um processo totalmente de condução para condução em conjunto com convecção. Como sabemos a taxa de transferência de calor por convecção é inferior à taxa de por condução, isto leva a uma diminuição de transferência de calor e por conseguinte um aumento da fluidez.

Segundo o estudo [10], com a imposição da vibração mecânica a fluidez do metal aumenta, como verificado neste presente estudo. Este aumento da fluidez leva a uma redução significativa dos defeitos internos nos fundidos, que por conseguinte melhora as suas características mecânicas.

A melhoria das características mecânicas está relacionada com a diminuição do tamanho de grão. Esta redução tende a aumentar com o aumento da vibração. Com a diminuição do tamanho de grão, não só ocorre uma redução dos defeitos internos, mas também é verificado um ligeiro aumento do alongamento.

Para além das melhorias obtidas na fluidez do metal com a imposição da vibração, existe ainda um aspeto que poderia aumentar ainda mais a fluidez do metal [15]. Este aspeto está relacionado com o aumento da percentagem de silício no nosso material. Como se verifica na Figura 50, para a percentagem de 7% de Si que é o caso, a fluidez é reduzida, mas para 14% de Si a fluidez já tem um aumento muito significativo. Esta alteração na liga em conjunto com a vibração, poderia levar a resultados ainda mais satisfatórios do que os obtidos. Em contra partida a liga passava de hipoeutética para eutética, o que não é desejável devido ao seu modo de solidificação [17].

Quanto ao escoamento existente, pensa-se que seja um escoamento turbulento [6] na interface do metal líquido, devido à imposição da vibração. Este poderá apenas ocorrer na interface do metal líquido fazendo com que ocorra a perda de contacto entre o metal líquido e as paredes da moldação. No seio do metal líquido pensa-se que ocorra um escoamento laminar [6], pois as amostras não apresentam os defeitos provenientes do fluxo turbulento.



## **PARTE V - CONCLUSÕES**

### 6.CONCLUSÕES

Com a análise das amostras do tipo A, B e C, podemos concluir que a vibração se torna benéfica para a fluidez destas.

Mas a esta nem sempre mostra efeitos benéficos. Para vibrações até aos 10 Hz, esta mostra ser prejudicial para os 6 tipos de amostras. Após esta frequência de vibração, ocorrem melhorias significativas até à frequência de vibração máxima. Com a frequência de vibração máxima é sempre atingida a maior fluidez para os 6 diferentes tipos de amostras.

Esta fluidez não tem sempre o mesmo comprimento como é de esperar, este varia de amostra para amostra. Após a análise dos três tipos de amostras foi possível constatar que a fluidez tem melhorias significativas, e em alguns casos esta é aumentada para cerca do dobro.

Pela observação dos gráficos dos 3 tipos de amostras vê-se que a fluidez decresce da amostra do tipo A para o tipo C. Como o que diferencia o tipo de amostras é a rugosidade de cada, sendo que a amostra do tipo A tem rugosidade teórica de 0  $\mu\text{m}$ , tipo B de 2,6  $\mu\text{m}$ , e por fim tipo C de 3  $\mu\text{m}$ , podemos dizer que a rugosidade poderá estar a provocar efeitos prejudiciais em conjunto com a vibração, visto que a maior fluidez é atingida na amostra com rugosidade teórica de 0  $\mu\text{m}$  para a vibração máxima e a fluidez mais baixa para a vibração máxima é atingida na amostra do tipo C.

Para as amostras do tipo D, E e F, podemos concluir, que nos três tipos de amostras não podemos afirmar que a vibração é benéfica, pois em todas elas com a vibração nula (0 Hz), a fluidez máxima foi atingida.

Este facto deve-se ao reduzido comprimento das amostras, que compromete o estudo da fluidez para estas, pois não foi possível saber qual a fluidez máxima que o material pode atingir. Isto é, a fluidez máxima possível de atingir é de 70 mm, que é o comprimento máximo das amostras, e é conseguida para a vibração nula (0 Hz), para a vibração máxima (25 Hz), em todas as amostras, mas também na amostra do tipo D para uma vibração de 16 Hz. Isto são dados que não foram favoráveis ao estudo destas amostras pois não podemos afirmar que vibração é benéfica, mas também não podemos dizer que é prejudicial, pois para a vibração máxima a fluidez máxima é atingida.

Tal como nas amostras do tipo A,B e C, para frequências de vibração até aos 10 Hz a vibração é prejudicial. Nas frequências de vibração posteriores a esta, assistimos a melhorias significativas em todas as amostras, até ao ponto de aos 25 Hz (vibração máxima) a fluidez máxima é atingida.

Depois de feita a análise das amostras D, E, e F, vê-se que a fluidez máxima é atingida mais vezes para a amostra com rugosidade teórica de 0  $\mu\text{m}$ . Este aumento abrupto da fluidez para as

amostras do tipo D, E, e F, está relacionada com o aumento da espessura das amostras como descrito na Tabela 7.

Um dos aspetos a ter em consideração é a rugosidade nas amostras em conjunto com a vibração. Ao longo deste estudo verificou-se que a rugosidade em conjunto com a vibração, provoca efeitos negativos na fluidez, reduzindo a fluidez conforme o aumento da rugosidade. Este fenómeno é verificado em todas as amostras.

A observação feita em relação à rugosidade, não pode ser aprofundada, pois este estudo não foi proporcionado para o efeito da rugosidade, mas sim para o efeito da frequência de vibração.

Pela observação do gráfico da amostra do tipo F (Figura 70), caso as amostras D, E e F, tivessem maior comprimento estas poderiam ter o mesmo comportamento que é apresentado nas amostras do tipo A, B e C, isto é, a fluidez máxima apenas é obtida com a vibração máxima em todos os tipos de amostras.

Por fim podemos dizer que frequência de vibração tem efeitos bastante benéficos, atingindo a maior fluidez para as amostras A,B e C, com a frequências de 25 Hz, e para as amostras do tipo D, E e F, atinge a fluidez máxima. Em alguns casos a fluidez aumenta para cerca do dobro.

Para finalizar, é possível dizer que o principal objetivo deste estudo foi alcançado, pois ficou provado que a vibração tem influência bastante positiva na fluidez do metal para frequências até os 25 Hz.





## **PARTE VI - TRABALHOS FUTUROS**

## **7. TRABALHOS FUTUROS**

Para trabalhos futuros, existem algumas vertentes que devem ser melhoradas e outras impostas.

Um dos aspetos a ser melhorado é a máquina de vibração. Esta deve ser melhorada ao nível da sua rotação máxima. Isto é, a velocidade de rotação deve ser aumentada de forma a obter uma gama de vibração maior. Pois neste estudo não foi possível determinar até que ponto a frequência de vibração se demonstra benéfica na fluidez do material.

Um outro aspeto a ter em conta para melhorar, é o comprimento das amostras do tipo D, E e F, isto é, encontrar um comprimento para que com uma frequência nula (0 Hz) a fluidez não seja máxima, de forma a aprofundar a análise, ou otimizar a temperatura da moldação para estas amostras.

Um dos trabalhos que deve ser imposto, deve ser a realização dos ensaios descritos anteriormente, mas agora para outro tipo de material, como por exemplo um bronze. Também deve ser efetuada uma análise metalúrgica, para verificar o efeito da vibração no tamanho de grão, e por conseguinte as propriedades mecânicas.

Outro tema que deve ser aprofundado e realizado, é a influência que a vibração em conjunto com a rugosidade pode ter na fluidez do metal.

## **PARTE VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

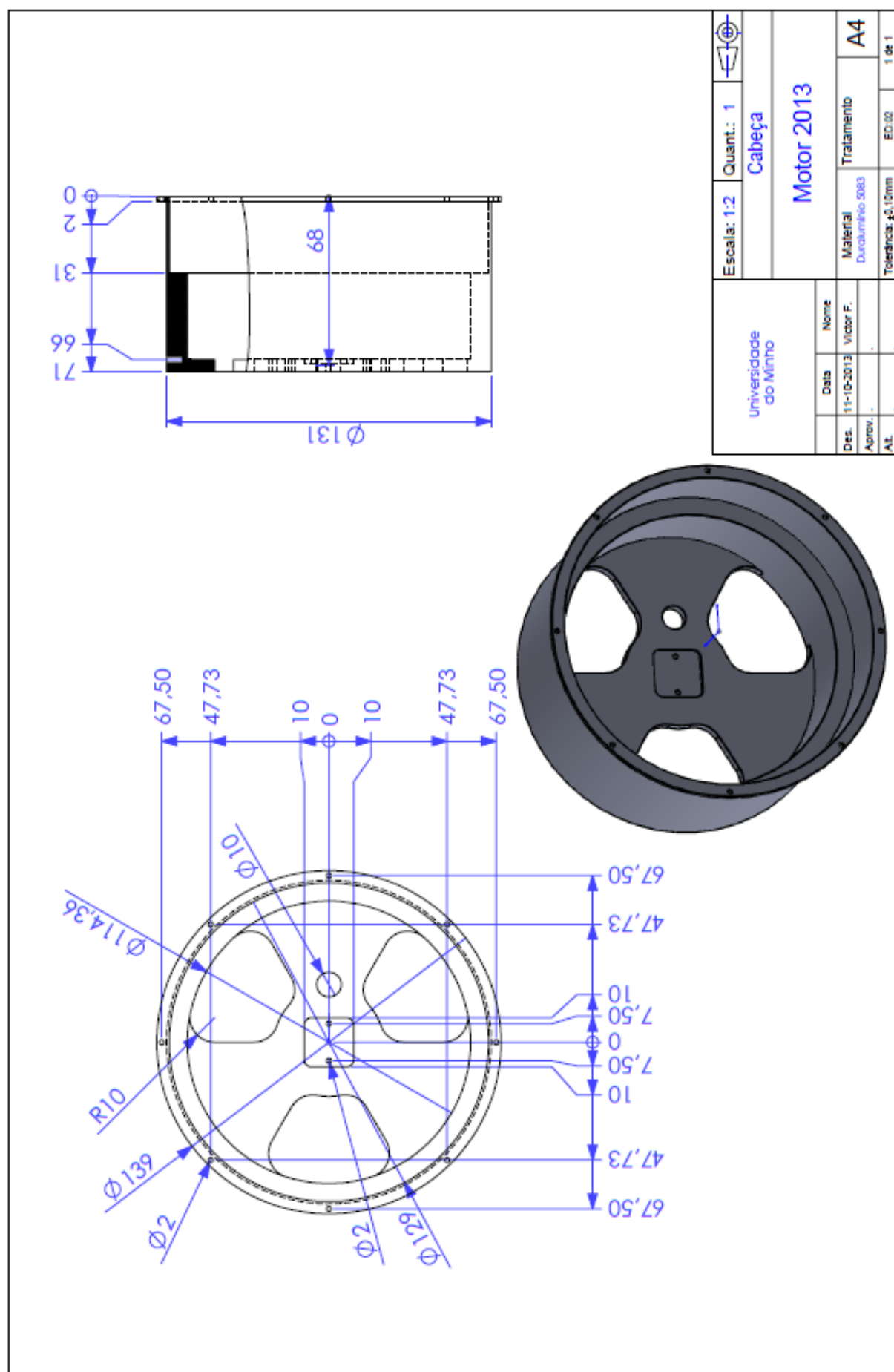
## 8.REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1] I. S. , D. S. , F. S. G. Chirita, “Influence of vibration on the solidification behaviour and tensile properties of an Al–18 wt%Si alloy,” 31 7 2008.
- 2] Waleed Abdul-Karem, Khalid F. Al-Raheem, Vibration improved the fluidity of aluminum alloys in thin wall investment casting’, International Journal of Engineering, Science and Technology, Vol. 3, No. 1, 2011, pp. 120-135.
- 3] J. M. d. Carvalho, Tecnologia de Fundição, Lisboa: Fundação Calouste, 1999.
- 4] J. Barbosa, Introdução àTecnologia de fundição, Universidade do Minho, 2003.
- 5] W. H. J. Brighton, Dinâmica dos Fluidos, Brasil: McGRAW-Hill.
- 6] “Fluidos, Escoamento em Conduas,” Maio 2008. [Online]. Available: [http://www.mspc.eng.br/fldetc/fluid\\_0630.shtml](http://www.mspc.eng.br/fldetc/fluid_0630.shtml). [Acedido em 14 8 2013].
- 7] J. J. M. F. Andrezo, “Materiais para Isolamento Térmico,” 23 4 2009. [Online]. Available: <http://isolamentotermico.blogspot.pt/2009/04/transmissao-de-calor.html>. [Acedido em 14 8 2013].
- 8] D. P. d. W. Frank P. Incropera, Fundamentos de transferência de calor e massa, Guanabara koogan 3ª Edição.
- 9] J. Meireles, Dinâmica de Estruturas, Guimarães: Universidade do Minho.
- 10] N. Omura, Y. Murakami, M. Li, T. Tamura, K. Miwa, H. Furukawa, M. Harada e M. Yokoi, “Effects of Mechanical Vibration on Macrostructure and Mechanical Properties of AC4C Aluminum Alloy Castings,” 2009.

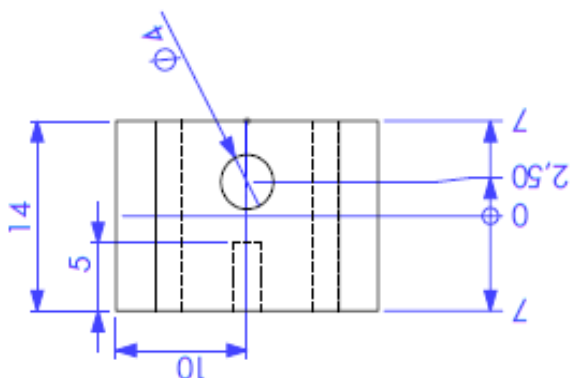
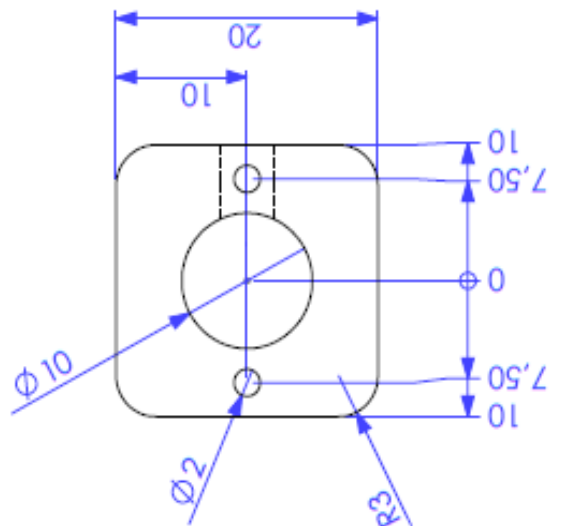
- 11] Z. Zhong, F. Zitian, D. Xuanpu, T. Bo, P. Di e L. Jiqiang, "Influence of mechanical vibration on the solidification of a lost foam cast 356 alloy".
- 12] A. S. Miranda, Transmissões Mecânicas, Universidade Do Minho.
- 13] W. F. Smith, Princípios de Ciência e Engenharia Dos Materiais, McGRAW-HILL de Portugal, 1998.
- 14] L. (. Bäckrud, Solidification characteristics of Aluminium Alloys, In volume 2 Foundry Alloys.
- 15] J. Campbell, Castings, London: Butterworth-Heinemann., 1991.
- 16] N. (. M. a. T. A. o. S.-T. Tenekedjiev, Microstructures and Thermal Analysis of Strontium-Treated Aluminium-Silicon Alloys, American Foundry Society, 1995.
- 17] K. Siavashi, "The Effect of Casting Parameters on the Fluidity and Porosity of Aluminium Alloys in the Lost Foam Casting Process," University BIRMINGHAM, 2011.




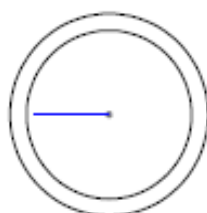
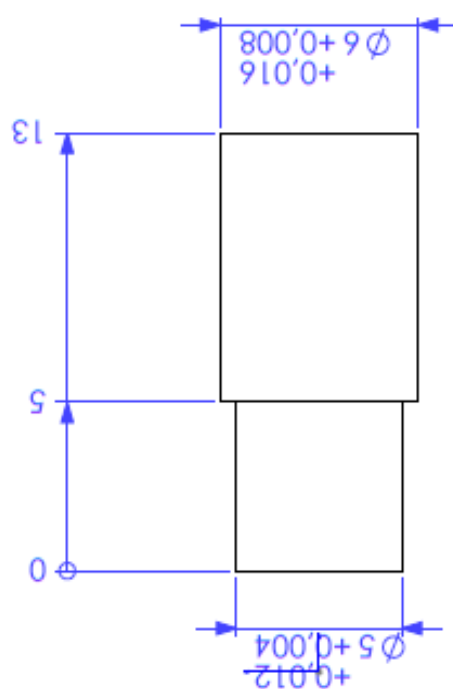
## **PARTE VIII – ANEXOS - DESENHOS TÉCNICOS DAS PEÇAS PRODUZIDAS**






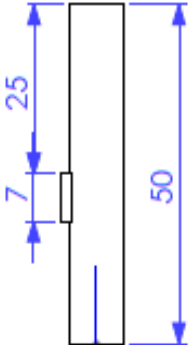
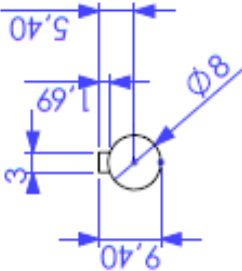


Universidade do Minho		Escala: 2:1	Quant.: 1		
Apalpador					
Motor 2013					
Des.	11-10-2013	Victor F.	Material	Tratamento	A4
Aprov.			Duraluminio 5083		
Alt.			Tolerância: ±0.10mm	ED 02	1 de 1



Universidade do Minho			Escala: 5:1	Quant.: x		
			Veio do rolamento			
			Motor 2013			
	Data	Nome	Material	Tratamento	A4	
Des.	11-10-2013	Victor F.	Duralumínio 5083			
Aprov.			Tolerância: $\pm 0,10\text{mm}$	ED:02		
A.L.				1 de 1		





Universidade do Minho		Escala: 1:1	Quant.: 1	
		Veio da roda dentada		
		Motor 2013		
Des.	11-10-2013	Victor F.	Material	A4
Aprov.	.	.	Durabilidade 5083	
Alt.	.	.	Tolerância: ±0,10mm	1 de 1
		ED:02		

